

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

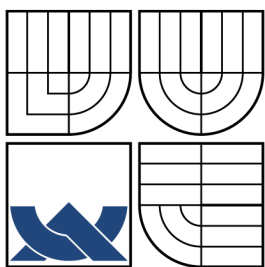
## ŠUMOVÁ DIAGNOSTIKA SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

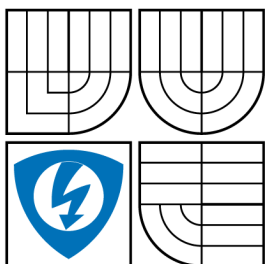
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARTIN KRAHULEC

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## ŠUMOVÁ DIAGNOSTIKA SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ NOISE DIAGNOSTIC OF SOLAR CELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARTIN KRAHULEC

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

ING.PETR SADOVSKÝ,PH.D.

BRNO 2008

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Martin Krahulec

Bytem:

Narozen/a (datum a místo): 20.8.1983, Olomouc

(dále jen "autor")

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

(dále jen "nabyvatel")

## Článek 1

### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☒ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Šumová diagnostika solárních článků

Vedoucí/školicitel VŠKP: Ing. Petr Sadovský, Ph.D.

Ústav: Ústav telekomunikací

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě - počet exemplářů 1
- ☒ elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
  - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
  - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
  - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
  - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....

Nabyvatel

.....

Autor

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá podrobným teoretickým a experimentálním studiem šumových a transportních charakteristik vybraných typů solárních článků v přímém i zpětném směru, zvláště pak v oblastech lokálních nestabilit PN přechodu (v oblastech výskytu mikroplazmy). Bude studována korelace mezi jednotlivými charakteristikami.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

solární článek, PN přechod, šum, šumová diagnostika, mikroplazma

## **ABSTRACT**

The thesis deals with detailed theoretical and experimental investigation of noise and transport characteristics of selected photovoltaic cells in both forward and reversed directions focusing on the area of local PN junction instability (within the microplasma regions). It will be studied the correlation among different characteristics.

## **KEYWORDS**

solar cell, PN junction, noise, noise diagnostic, microplasma

Krahulec M. *Název práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2008. Počet stran 65., Počet stran příloh 5. Diplomová práce. Vedoucí práce byl Ing.Petr Sadovský Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Šumová diagnostika solárních článků“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Petrovi Sadovskému, PhD. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce. Také chci poděkovat svým rodičům, kteří mi umožnili studium a byli mi podporou při vypracování diplomové práce.

V Brně dne .....

.....  
(podpis autora)



# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>13</b>
<b>1 Základní poznatky o PN přechodu</b>	<b>14</b>
1.1 Absorpce energie zářením . . . . .	16
1.2 Fotoelektrický jev . . . . .	17
1.3 Fotovoltaický jev . . . . .	17
<b>2 Šum</b>	<b>18</b>
2.1 Spektrální výkonová hustota . . . . .	18
2.2 Tepelný šum . . . . .	19
2.3 Výstřelový šum . . . . .	19
2.4 Rozdělovací šum . . . . .	19
2.5 Generačně rekombinační šum . . . . .	20
2.6 Šum typu $1/f$ . . . . .	20
2.7 Lavinový šum . . . . .	21
2.8 Impulzní šum . . . . .	21
2.8.1 RTS šum . . . . .	22
2.8.2 Šum mikroplazmatu . . . . .	22
<b>3 Solární články</b>	<b>24</b>
3.1 Činnost a vlastnosti solárních článků . . . . .	24
3.2 Materiál pro výrobu solárních článků . . . . .	25
<b>4 Pracoviště kontinuálního měření</b>	<b>27</b>
4.1 Měřicí karta DAQmx 6251 . . . . .	28
4.2 Instalace karty DAQ - Data Acquisition karta . . . . .	29
4.3 LabVIEW . . . . .	29
4.4 Uživatelské prostředí měření . . . . .	29
4.4.1 Aplikace pro zjištění defektní oblasti PN přechodu . . . . .	30
4.4.2 Aplikace podrobného měření na daném rozsahu . . . . .	32
<b>5 Vzdálená laboratoř</b>	<b>38</b>
5.1 LabVIEW vzdálená laboratoř . . . . .	38
5.2 Spuštění serveru vzdálené laboratoře . . . . .	38
<b>6 Měření šumových a transportních charakteristik</b>	<b>42</b>
6.1 Šumové charakteristiky solárních článků . . . . .	42
6.1.1 Frekvenční filtry . . . . .	43

6.1.2	Nalezení defektní oblasti PN přechodu . . . . .	44
6.1.3	Podrobné měření na defektní oblasti - časový průběh . . . . .	45
6.1.4	Spektrální analýza . . . . .	47
6.2	Měření transportní charakteristiky solárních článků . . . . .	50
6.2.1	Zapojení v přímém směru . . . . .	51
6.2.2	Zapojení v závěrném směru . . . . .	52
6.2.3	Detekce efektivní hodnoty šumového proudu . . . . .	54
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>55</b>
	<b>Reference</b>	<b>57</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>58</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>60</b>
<b>A</b>	<b>Ovládací prvky a bloková schémata programu LabVIEW</b>	<b>61</b>
A.1	Nastavení Instruments I/OAssistant . . . . .	61
A.2	Zdrojový kód programu podrobného měření na daném rozsahu . . . . .	62
<b>B</b>	<b>Prezentování vzdáleného měření na webu</b>	<b>63</b>
B.1	Úvodní stránka . . . . .	63
B.2	Stránka měření . . . . .	64
B.3	Výsledky měření . . . . .	65

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Pásové schéma pro izolanty, polovodiče a kovy . . . . .	14
1.2	a) Polovodič typu N, b) polovodič typu P . . . . .	15
1.3	a) Pásové schéma polovodiče P a N, b) vznik PN přechodu v polovodičích . . . . .	16
1.4	Absorpce fotonu . . . . .	16
3.1	Struktura solárního článku . . . . .	24
3.2	Kontakty solárního článku . . . . .	25
4.1	Princip měření kontinuálního pracoviště . . . . .	27
4.2	Měřicí karta DAQmx 6251 . . . . .	28
4.3	Konektorový blok . . . . .	28
4.4	Přední panel aplikace nalezení šumu mikroplazmatu . . . . .	31
4.5	Blokový diagram aplikace nalezení šumu mikroplazmatu . . . . .	32
4.6	Přední panel aplikace podrobného měření na dané oblasti . . . . .	33
4.7	Princip řízení zdroje napětí - zdrojový kód . . . . .	33
4.8	Uzel Select . . . . .	34
4.9	Princip navyšování vzorkovací frekvence - zdrojový kód . . . . .	35
4.10	Princip ukládání dat do souboru - zdrojový kód . . . . .	36
4.11	Blokové schéma programu kontinuálního měření . . . . .	37
5.1	Vzdálená laboratoř . . . . .	38
5.2	Nastavení LabVIEW serveru pro vzdálenou laboratoř . . . . .	39
5.3	Dialogové okno pro povolení vzdálené laboratoře . . . . .	40
5.4	URL adresa aplikace vzdálené laboratoře . . . . .	40
5.5	Remote panel . . . . .	41
6.1	Šum typu A . . . . .	42
6.2	Šum typu B . . . . .	42
6.3	Schéma měřicího pracoviště . . . . .	43
6.4	Spektrální hustota pro šum typu A a B . . . . .	44
6.5	Přední panel programu nalezení šumu mikroplazmatu . . . . .	45
6.6	Průběh šumu mikroplazmatu, $F_{vz} = 1 \text{ MHz}$ , $U_R = 14,3 \text{ V}$ . . . . .	46
6.7	Zvětšený průběh šumu mikroplazmatu, $F_{vz} = 1 \text{ MHz}$ , $U_R = 14,3 \text{ V}$ . . . . .	46
6.8	Naměřené signály pro různé vzorkovací frekvence . . . . .	48
6.9	Spektrální hustoty výkonu šumu mikroplazmatu pro jednotlivé vzorkovací frekvence . . . . .	49
6.10	Spektrální hustota výkonu šumu mikroplazmatu . . . . .	50
6.11	Zapojení pro měření VACH charakteristik . . . . .	51
6.12	V-A charakteristika v propustném směru, vzorek K1 . . . . .	52
6.13	V-A charakteristika v závěrném směru, vzorek K1, $U_R = 14,3 \text{ V}$ . . . . .	53

6.14 V-A charakteristika v závěrném směru, vzorek K1, $U_R = 20,3\text{ V}$ . . .	53
6.15 Efektivní hodnota šumového proudu . . . . .	54

# ÚVOD

V současné době jsou hlavním zdrojem energie ropa, zemní plyn, uhlí nebo jaderná energie získaná z uranu. Všechny tyto zdroje pocházejí těžbou surovin ze země a hlavním problémem je jejich vyčerpatelnost a proto je na čase se poohlížet po jiných, které by mohli v budoucnu zcela nahradit stávající. Všechn život na Zemi je založen na energii slunečního záření. Slunce by se tedy mohlo stát alternativním zdrojem energie pro budoucí generace. Pro získávání elektrické energie ze slunečního záření jsou využívány tzv. solární panely, jež jsou tvořeny spojením solárních článků. Při realizaci takové soustavy se vyskytuje problém částečného zastínění solárního panelu. V tuto chvíli se ze zastíněných článků stávají spotřebiče a ostatní články v soustavě je napájí. Dalším problémem je zvýšení účinnosti solárních článků jež je ovlivněna počtem defektních oblastí na PN přechodu způsobených kvalitou technologie výroby solárních článků.

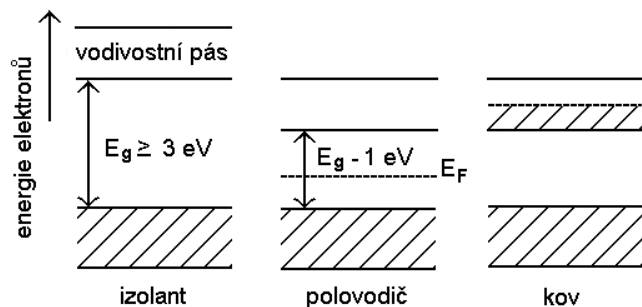
Tato práce se zabývá problematikou polovodičů, dále pak PN přechodů a vysvětlení podstaty šumu, což dále umožňuje pochopit problémy spojené s transportními a šumovými charakteristikami solárních článků a je ukázán postup jejich měření. Jsou užity základní metody pro zjištění defektní oblasti a tedy lokálního průrazu PN přechodu. Měření šumového signálu v časové oblasti, měření V-A charakteristiky s užitím napěťového zdroje, detekce efektivní hodnoty šumového proudu, měření výkonové spektrální hustoty.

Velká část práce je zaměřena na vytvoření měřícího pracoviště umožňující kontinuální měření šumových charakteristik solárních článků v časové oblasti. K tomuto účelu byla využita měřící karta DAQmx od firmy National instruments spolu se softwarem Labview. Bylo sestaveno automatické měřící pracoviště, kde probíhá kontinuální měření s vzorkovací frekvencí až 1 MHz s ukládáním získaných dat na pevný disk. Takto uložená data jsou připravena k dalšímu zpracování.

Dále bylo provedeno měření a analyzování výsledků pro jednotlivé způsoby měření a závěrem byla vybrána metoda pro rychlé a efektivní nalezení defektní oblasti na PN přechodu.

# 1 ZÁKLADNÍ POZNATKY O PN PŘECHODU

Pevné látky můžeme rozdělit podle jejich vodivostních vlastností a závislosti na teplotě na vodiče, polovodiče a izolanty. Jednotlivé typy také můžeme charakterizovat pomocí elektronové energetické struktury (viz obrázek 1.1).



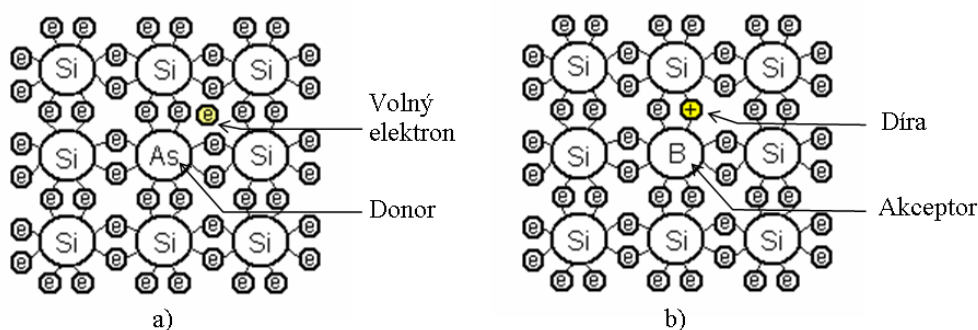
Obrázek 1.1: Pásové schéma pro izolanty, polovodiče a kovy

Valenční pás je poslední pás, ve kterém se v základním stavu vyskytují nějaké elektrony. Zakázaný pás je interval energií, které nemohou elektrony nabývat, nejsou v něm tedy žádné energetické hladiny. Vodivostní pás je interval energií, které umožňují elektronům pohybovat se prakticky volně mezi atomy (elektrony mají tak vysokou energii, že už nejsou vázány ke konkrétním jádrům). Elektrony ve vodivostním pásu se nazývají volné a jsou to ty elektrony, které jsou nutné pro vedení elektrického proudu.

Je-li valenční pás plně obsazen a vodivostní pás úplně prázdný, je počet volných elektronů při dostatečně nízké teplotě nulový. To je typický příklad izolantu, ale i polovodiče. Rozdíl je zde jen v šířce zakázaného pásma  $E_g$ , která je pro izolanty větší než 3 eV. Elektrony nemohou získat takovou energii a tedy překonat tento zakázaný pás a z tohoto důvodu izolant nemůže vést proud. U polovodičů je zakázaný pás menší než 3 eV a elektrony mohou přejít do vodivostního pásu. Jsou-li ve valenčním pásu volné elektrony, hovoříme o kovech. V jejich energetické struktuře dochází k překrytí valenčního pásu s vodivostním a zakázaný pás se u kovů vůbec nevyskytuje. Na obrázku 1.1 je vyznačena i Fermiho hladina  $E_F$ , na které je pravděpodobnost výskytu volného elektronu 50 % [1].

Polovodiče rozdělujeme na vlastní a příměsové. Vlastní polovodič má volné elektrony ve vodivostním pásu, které zajišťují vedení elektrického proudu. Tyto nosiče náboje přeskočily do vodivostního pásu z valenčního, tj. překonaly šířku zakázaného pásu  $E_g$ . K tomu potřebovaly právě větší energii než je  $E_g$ , která jim mohla být dodána formou tepelné, optické nebo i jiné energie. Příměsový polovodič je založen na obohacení o elektricky aktivních atomů do substitučních míst čistého polovodiče

a to buď donorů nebo akceptorů (viz obr. 1.2). V případě zabudování donorů jsou přidány do čistého polovodiče atomy, které mají o jeden elektron více než čistý polovodič. Koncentrace elektronů je tedy větší než koncentrace děr. Vedení elektrického proudu tedy zajišťují volné elektrony. Tento druh polovodičů se nazývá typ N. V případě přidání akceptorů je naopak koncentrace děr větší než koncentrace elektronů. To zajistí atomy které mají o jeden elektron méně než čistý polovodič. Vznikají tak volné místa do kterých se usazují elektrony a jejich místo zaujme jiný elektron. Vedení elektrického proudu tedy zajišťují volná místa nazývané díry. Tento druh polovodičů se nazývá typ P. O P-N přechod se jedná, je-li v krystalu oblast s vodivostí typu N, na kterou navazuje bezprostředně oblast typu P, přičemž se přechod z jedné oblasti do druhé uskutečňuje uvnitř jednoho monokrystalu [1].

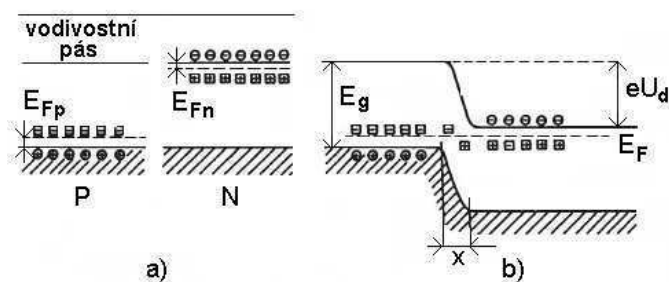


Obrázek 1.2: a) Polovodič typu N, b) polovodič typu P

Obrázek 1.2 a) znázorňuje dotaci křemíkového polovodiče Arsenem, který má o jeden elektron více než křemík a vzniká tak volný elektron který se může pohybovat krystalickou mřížkou. Stačí jen malé množství příměsi (řádově  $10^{-5}$ ) a dojde k dostatečnému zvýšení vodivosti, kterou nazýváme nevlastní vodivost. Arsen, který dodává volný elektron je označován jako donor. Majoritními nosiči jsou elektrony a tento typ polovodiče nazýváme N.

Dotuje-li se však čtyřmocný křemík prvkem, který má naopak o jeden elektron méně jak je vidět v případě b), kde dotujeme polovodič bórem, vznikne v polovodiči volné místo, které označujeme jako díra. Na toto místo se přesune volný elektron, který zároveň zanechá nové volné místo. Dochází tak k putování děr polovodičem, tedy majoritními nosiči náboje jsou díry. Protože třímocný bór přijímá elektron, nazývá se tento prvek jako akceptor. Jedná se o polovodič typu P.

Na obrázku 1.3 je znázorněno pásové schéma polovodiče P a N. Fermiho hladina je u polovodiče typu P níž než u polovodiče typu N. Navazují-li tyto oblasti bezprostředně na sebe, elektrony z polovodiče typu N přecházejí do polovodiče typu P a naopak díry z polovodiče typu P do polovodiče typu N. Tomuto toku elektronů

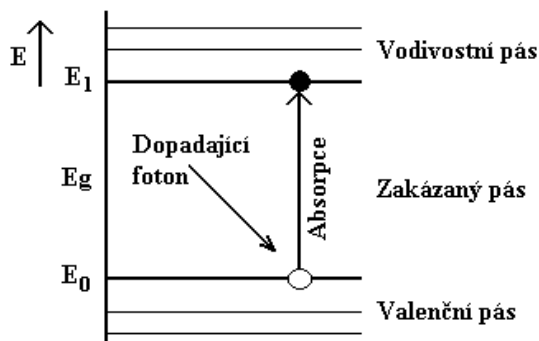


Obrázek 1.3: a) Pásové schéma polovodiče P a N, b) vznik PN přechodu v polovodičích

říkáme driftový proud. Tímto dochází k vyrovnání Fermiho energetických hladin, které má za následek, že v společném pásovém modelu vznikne potenciálový val o výšce  $eU_d$ , kde  $U_d$  je difuzní napětí [1].

## 1.1 Absorpce energie záření

Vhodné látky pro absorpci energie záření, tedy absorpci energie fotonů jsou polovodiče, protože šířka jejich zakázaného pásu je 1 - 4 eV. Absorpci energie lze dobře popsat pomocí pásového diagramu polovodiče na obrázku 1.4. Jsou zde znázorněny jednotlivé energetické pásy i s některými energetickými hladinami valenčního a vodivostního pásu. Dále budeme uvažovat elektrony pouze z nejvyšších hladin valenčního pásu, protože energie potřebná pro uvolnění elektronu z níže energeticky postavených hladin by musela být řádově MeV, čemuž odpovídá Rentgenovo záření a záření gama. K absorpci fotonu dojde jen tehdy, má-li foton energii rovnou rozdílu mezi energií odpovídající hladině kam se elektron dostává a energií hladiny, ve které se právě nachází [3].



Obrázek 1.4: Absorpce fotonu



## 1.2 Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev lze rozdělit na vnější a vnitřní podle toho, zda dochází k uvolnění elektronů uvnitř látky nebo do jejího okolí.

### Vnější fotoelektrický jev

Tento jev probíhá převážně v kovech a v některých polovodičích. Dopad fotonů na látku způsobuje, že elektrony opouští vlivem absorpcí zářivé energie povrch materiálu. K tomu je potřeba jim dodat energii danou rozdílem energetické úrovně vakua a Fermiho energetické hladiny, který nazýváme ionizační energie. Dopadněli tedy foton na povrch materiálu o energii rovné alespoň ionizační, může dojít k uvolnění elektronu z povrchu materiálu. Tím vzniknou volné místa, do kterých se přesunují elektrony. Zvýší se tak pohyblivost volných nosičů a tím vodivost materiálu [3].

### Vnitřní fotoelektrický jev

Využívá se zejména u polovodičů, kde je valenční a vodivostní pás oddělen úzkým zakázaným pásem. Elektron ve valenčním pásu, který pohltí foton o energii větší než šířka zakázaného pásu přejde do pásu vodivostního. Tím se zvýší koncentrace volných nosičů. To má za následek zvýšení vodivosti materiálu [3].

## 1.3 Fotovoltaický jev

Fotony, které dopadají na PN přechod o energii větší než  $E_g$  tedy takové, aby elektron překonal šířku zakázaného pásu, vyvolají vznik napětí na vývodech PN přechodu. Dopadající fotony na PN přechod vyvolají vznik páru elektron - díra, který je okamžitě vlivem silného elektrického pole  $U_d/x$  (viz obr. 3.2) rozdělen a na oblasti P vzniká kladný pól a na oblasti N vzniká pól záporný [3].

## 2 ŠUM

Šum vzniká fluktuací makroskopicky měřitelných veličin. Vzhledem k mikrostruktuře látky se šum objevuje ve všech materiálech a součástkách. Šum vzniká buď jako odraz mikrofyzikálních dějů při různých vodivostních mechanismech nebo jako odraz nedokonalosti v technologii (například nehomogenita látky ze které je součástka vyrobena) [4].

Z toho tedy vyplývá, že lze na šum nahlížet ze dvou pohledů a to jako na rušivý signál, který je potřeba eliminovat od užitečného signálu a nebo jako na užitečný signál, který je zdrojem informací o dějích probíhajících uvnitř nějaké dané soustavy, a z kterého lze určit její vlastnosti.

Šum se v elektrotechnice projevuje šumovým napětím nebo proudem a k určení jeho hodnoty se využívá spektrální výkonová hustota.

### 2.1 Spektrální výkonová hustota

Výkonová spektrální hustota signálu charakterizuje rozdělení výkonu signálu v závislosti na kmitočtu. Přibližně lze říci, že představuje výkon signálu na odporu  $1\ \Omega$  v kmitočtovém pásmu o šířce  $1\ \text{Hz}$ . Přesněji jde o limitu podílu výkonu připadajícího na určitý interval kmitočtů k délce tohoto intervalu, blíží-li se délka tohoto intervalu k nule.

S výkonovou spektrální hustotou lze pracovat dvěma způsoby a to jako s jednostrannou spektrální výkonovou hustotou  $G_{xx}(f)$  definovanou pro kmitočty  $f > 0$ , nebo s dvoustrannou výkonovou spektrální hustotou  $S_{xx}(f)$  definovanou pro kmitočty  $f(-\infty, \infty)$ . Vzájemný vztah mezi oběma spektrálními hustotami je dle [6]:

$$G_{xx}(f) = \begin{cases} 2S_{xx}(f) & \text{pro } f \geq 0 \\ 0 & \text{pro } f < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Výkon šumu v kmitočtovém pásmu  $< f_1, f_2 >$ :

$$P(f_1, f_2) = \int_{f_1}^{f_2} G_{xx}(f) df \quad (2.2)$$

kde  $G_{xx}(f)$  je jednostranná spektrální výkonová hustota,  $S_{xx}(f)$  je dvoustranná spektrální výkonová hustota,  $f$  je kmitočet.

Její jednotkou je  $\text{VHz}^{-1}$ , případně  $\text{V}^2\text{Hz}^{-1}$ . Při použití obou jednotek vycházejí stejné číselné hodnoty, protože se předpokládá, že jde o výkon na odporu  $1\ \Omega$ .

Výkonová spektrální hustota se používá pro charakterizování rozložení energie v závislosti na kmitočtu pro stacionární náhodné signály, jejichž kmitočtové spektrum je spojitě [6].

## 2.2 Tepelný šum

Tepelný šum, který je také znám pod názvem Johnsonův šum, vzniká důsledkem náhodné generace pohybu nosičů náboje (obvykle elektronů) vlivem teploty na odporu  $R$ . Projevuje se šumovým napětím  $U_T$  na jeho svorkách o výkonové spektrální hustotě napětí  $S_U(f)$ . Tepelný šum se může aproximovat bílým šumem, protože má konstantní hodnotu v celém kmitočtovém pásmu. Spektrální výkonová hustota šumového napětí je určena [4]:

$$S_U(f) = 4kTR \frac{hf}{kT} \left( e^{\frac{hf}{kT}} \right)^{-1} \quad (2.3)$$

kde  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  [J/K] je Boltzmanova konstanta,  $T$  je termodynamická teplota a  $R$  odpor rezistoru.

Pro nízké frekvence platí  $hf \ll kT$ , potom lze vztah 2.3 upravit [4]:

$$S_U(f) = 4kTR, \quad (2.4)$$

## 2.3 Výstřelový šum

Výstřelkový šum je generován nosiči náboje při přecházení přes potenciálovou bariéru. Jedná se o šum daný vlivem impulsů proudu vznikajících důsledkem průchodů nosičů náboje otevřeným PN přechodem. Vzhledem k diskrétnímu charakteru nosičů, je tedy na proud  $I$  superponován i šumový proud  $i$ , označován jako výstřelový. Takový šumový proud se vyskytuje například u vakuových diod nebo u přechodu PN. Výkonová spektrální hustota výstřelového šumu je pro frekvence srovnatelné a vyšší než převrácená hodnota doby průchodu  $t$  nosiče dána vztahem [4]:

$$S_i(f, I) = 2eI \left( \frac{\sin \pi f T}{\pi f T} \right)^2 \quad (2.5)$$

kde  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C je elementární náboj elektronu,  $I$  je střední hodnota proudu,  $f$  je frekvence,  $t$  je doba průchodu nosiče potenciálovou bariérou.

Pro frekvence nižší lze použít vztah [4]:

$$S_i(f, I) = 2eI, \quad (2.6)$$

## 2.4 Rozdělovací šum

Rozdělovací šum se vzniká při rozdělování nábojů, které jsou emitovány z katody dopadají náhodně na jednu ze dvou anod. Počty nábojů  $n_1$  a  $n_2$  dopadajících na anody mají binomické rozdělení. Výkonová spektrální hustota je podle rovna [4]:

$$S_i(f) = 2e \frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2}, \quad (2.7)$$

kde  $I_1$  a  $I_2$  jsou proudy, které tečou anodami.

## 2.5 Generačně rekombinační šum

Generačně rekombinační šum se vyskytuje u polovodičů a kovů. Je vyvolán fluktuacemi volných elektronů a děr. Tyto fluktuace jsou důsledkem kvantových přechodů nosičů mezi valenčním a vodivostním pásem a i mezi diskrétními energetickými hladinami v zakázaném pásu [4].

Pro každý typ přechodu  $k$ , ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) je charakterizován spektrální výkonovou hustotou [4]:

$$S_i(\omega, T) = A_k I^2 \frac{1}{1 + \omega \tau_k^2}, \quad (2.8)$$

kde  $\tau_k$  je šumová časová konstanta,  $\omega$  je driftová rychlost.

## 2.6 Šum typu $1/f$

Je takový signál nebo proces, který vzniká pouze v elektrickém poli a jehož spektrální výkonová hustota je přímo úměrná převrácené hodnotě frekvence. Šum  $1/f$  je vysoce závislý na kvalitě a stavu povrchu polovodiče, čímž nám slouží jako citlivý indikátor kvality a vypovídá o kvalitě technologie výroby materiálů pro elektroniku a konstrukci součástek. Šum  $1/f$  vzniká v mnoha fyzikálních i biologických systémech. Výzkumy a práce od Aldera van der Ziela popisuje, že tento šum je všude přítomný [7]. Jeho závislost výkonové spektrální hustoty na frekvenci je podle následujícího vztahu [4]:

$$S_i(f) A \frac{I^n}{f^\alpha}, \quad (2.9)$$

kde  $A$  je konstanta,  $n = 2$  a  $\alpha \in (0, 2)$  obvykle je však hodnota  $\alpha$  rovna 1.

Celkový výkon signálu je:

$$P = \int_0^\infty S df = \int_0^\infty A \frac{I^n}{f^\alpha} df \rightarrow \infty, \quad (2.10)$$

Dle 2.10 hodnota výkonu šumu  $1/f$  vychází z intervalu  $< f_1, f_2 >$  je-li hodnota  $f_2$  nekonečná, pak i hodnota výkonu je nekonečná. Prakticky může být šum  $1/f$  jen v určitém intervalu frekvencí. Pro frekvenci  $f_2$  je pak horní limit frekvencí měřitelný. Obdobně pro hodnotu  $f_1 = 0$  by byl výkon nekonečný. Z toho plyne,

že signál musí být omezen i v dolní části spektra, tedy musí existovat dolní limit, ten však nebyl dosud nalezen. Pro PN přechod polarizovaný v závěrném směru je spektrální výkonová hustota šumu  $1/f$  konstantní v závislosti na teplotě, nebo častěji nelineární závislost na teplotě [4].

## 2.7 Lavinový šum

Vyskytuje se u polovodičových struktur, ve kterých dochází k lavinovému průrazu v důsledku nárazové ionizace v silných elektrických polích. Takové elektrické pole může být například PN přechod zapojený v závěrném směru. Jeho vznik je podmíněn fluktuací generovaných elektronů a děr nárazovou ionizací. Při vzniku lavinového průrazu, to znamená, že součinitel nárazové ionizace elektronů a děr  $M \rightarrow \infty$ , je výkonová spektrální hustota rovna [4]:

$$S_i(\omega) = \frac{8eI_R v^2}{W^2 \omega^2} = \frac{8eI_R}{T^2 \omega^2}, \quad (2.11)$$

kde  $T = W/v$  je doba průchodu nosiče přechodem,  $W$  je šířka báze a  $\omega$  je driftová rychlost,  $I_R$  je střední hodnota proudu tekoucího přechodem v zpětném směru.

## 2.8 Impulzní šum

Vyskytuje se v polovodičových součástkách, kde se může vyskytnout náhodná fluktuace proudu ve tvaru impulzů, které mají náhodný čas vzniku a náhodnou délku trvání. Jsou známy dva fyzikální důvody vzniku šumu tohoto typu:

1. RTS šum (Random Telegraph Signal) - neboli burst noise
2. Šum mikroplazmatu

Spektrální hustota je rovna [4]:

$$S_i(\omega) = \frac{A_k}{1 + \omega^2 \tau_k^2}, \quad (2.12)$$

kde  $\omega$  je driftová rychlost,  $\tau_k$  je šumová časová konstanta.

Statistický model pro popis impulsního šumu je stejný pro RTS šum i pro šum mikroplazmatu, i když se jedná o dva fyzikálně zcela odlišné jevy. Problémem může být rozpoznání těchto dvou šumů. Platí, že amplituda impulzů mikroplazmatu je asi 1000-krát větší než u RTS šumu, ale naopak šířka impulzů šumu mikroplazmatu může být extrémně malá (řádově až  $10^{-11}$  s). Dalším rozdílem mezi těmito šумы je vliv kapacity přechodu, který u mikroplazmatu ovlivňuje tvar impulzu, kdežto u RTS šumu se může tento vliv paralelní kapacity přechodu zanedbat, protože z důvodu

rozdílu velikostí jejich amplitud, je vliv kapacity přechodu 1000-krát menší pro RTS šum, než na tvar impulzu šumu mikroplazmatu [4].

### 2.8.1 RTS šum

Objevuje se nejen u polovodičových součástek, ale i u rezistorů. V nejjednodušším případě je podoben náhodnému telegrafnímu signálu.

V PN přechodech je tento šum způsoben bistabilními fluktuacemi potenciálové bariéry defektu v oblasti prostorového náboje PN přechodu, která je řízena zachycováním nebo emisí jednotlivého nosiče na pasti v generačně rekombinačním centru v blízkosti defektu.

K vysvětlení vzniku tohoto šumu se vychází z toho, že velké poruchy v monokrystalu lokalizované v ochuzené vrstvě PN přechodu tvoří Shottkyho bariéry, které jsou zdrojem nadbytečného proudu a RTS šumu. Jestliže je v blízkosti Shottkyho bariéry rekombinační centrum, potom nábojové obsazení centra řídí výšku potenciálové bariéry a způsobuje tak diskrétní fluktuaci proudu tekoucího PN přechodem. Vícehladinový šum může vzniknout, existuje-li v přechodu více defektů toho to typu, nebo je-li poblíž více generačně rekombinačních center. Primárním procesem je generačně rekombinační proces v generačně rekombinačním centru (náhodné obsazování rekombinačního centra nosičem a následná emise). Sekundárním procesem je pak modulace elektrického proudu vyvolaná změnou bariéry mezi kovem a polovodičem [4].

Amplituda impulzů RTS šumu je řádově  $10^{-10}$  až  $10^{-8}$  A. Doba trvání impulzů se nachází v širokém intervalu  $10^{-6}$  až  $10^{-3}$  s [4]. Spektrální výkonová hustota proudu je ve tvaru (2.12).

### 2.8.2 Šum mikroplazmatu

Šum mikroplazmatu je způsoben lokálními průrazy v malé oblasti PN přechodu v místech, kde se vyskytuje defektní oblast PN přechodu zapojeného v závěrném směru. Je tedy výsledkem nedokonalosti přechodu a vede ke zhoršení vlastností PN přechodu. Obvykle vzniká při vyšších závěrných napětích, ale ne tolik vysokých, aby došlo ke zničení PN přechodu (pro křemíkový polovodič se průrazné napětí pohybuje mezi 50 V až 1500 V) [4]. Mikroplazma se projevuje jako proudové impulzy, které mají náhodnou šířku a náhodnou dobu vzniku. Doba jejich trvání závisí na připojeném závěrném napětí, čím vyšší je napětí, tím více roste šířka pulsů až do okamžiku, kdy dosáhne proud stabilní hodnoty. Vlivem fluktuace napětí na oblasti mikroplazmatu může intenzita elektrického pole klesnout pod hodnotu potřebnou k udržení výboje a tedy vedení proudu ustává. Toto se může opakovat i pro vyšší

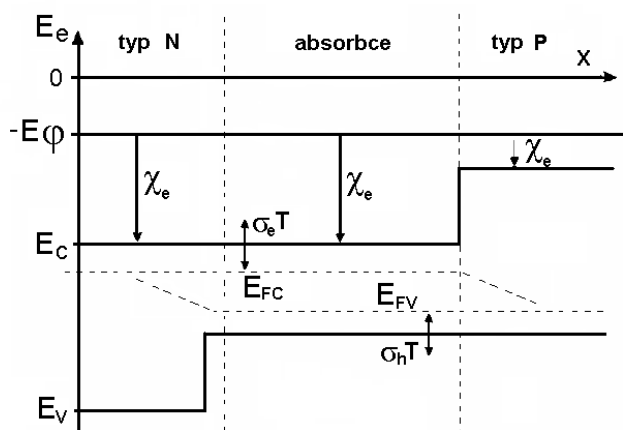
napětí. Tedy na jednom PN přechodu může dojít k výskytu mikroplazmy pro více úrovní závěrného napětí. Spektrální výkonová hustota proudu je opět ve tvaru (2.12) [4].

### 3 SOLÁRNÍ ČLÁNKY

Přeměna světelné energie na energii elektrickou se zajišťuje pomocí solárních článků. Účinnost solárních článků se pro různé typy pohybuje mezi  $12\% \div 20\%$ . To vede ke zkoumání vlastností solárních článků, ze kterých jsou tyto solární panely vyrobeny za účelem zlepšení jejich kvality a účinnosti.

#### 3.1 Činnost a vlastnosti solárních článků

Funkce solárních článků je založena na fotovoltaičtém jevu (viz kapitola 1.3). Jedná se vlastně o PN přechod zapojený v závěrném směru. Dopadne-li foton na povrch solárního článku dojde k absorpci energie fotonu a vzniku páru elektron - díra. Snahou je tyto dvojice nosičů náboje separovat, za účelem vzniku potenciálu. Aby byly elektrony na straně jedné a díry na straně druhé, přiloží se na jednu stranu vodící polovodič pro elektrony a na druhou pro díry. Protože polovodič typu N je ochuzen o díry, tudíž nosičem náboje zde jsou elektrony, víme že právě tento polovodič N nám zajistí přesun elektronů do této oblasti. Na straně druhé polovodič typu P, ve kterém dochází k vedení proudu pomocí pohybu děr, přitahuje díry vzniklé v absorpční oblasti. Tedy přiložením polovodiče typu N na straně jedné a polovodiče typu P na straně druhé, získáme rozdělení páru elektron - díra a tak i elektrický potenciál na svorkách solárního článku. Na obrázku 3.1 vidíme strukturu solárního článku, kde polovodič typu N na levé straně a polovodič P na straně druhé představují polopropustné membrány pro elektrony a díry.



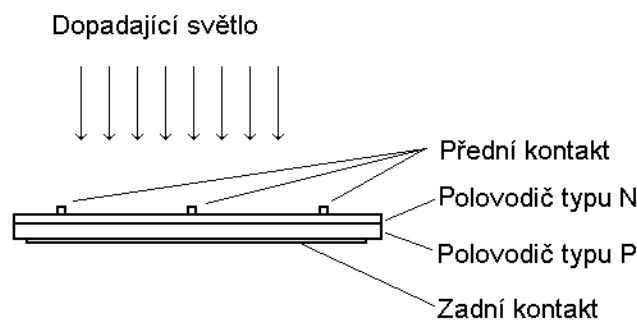
Obrázek 3.1: Struktura solárního článku

$e_{FC}$  - Fermiho energetická hladina pro elektrony distribuované ve vodivostním pásu;  $E_{FV}$  - Fermiho energetická hladina pro elektrony distribuované ve valenčním



pásu;  $\chi_e$  - elektronová afinita, je to energetická bilance děje, při kterém vzniká z prvku v základním stavu aniont.

Na obrázku 3.1 je znázorněna struktura solárního článku ve struktuře pásového modelu. Polovodič typu N na levé straně tvoří takzvanou polopropustnou membránu a stejně tak polovodič typu P na straně pravé. Na polopropustné membrány by se též dalo dívat i opačným způsobem, tedy, že polovodič typu N nejen propouští elektrony, ale také zadržuje díry a polovodič typu P zadržuje elektrony. Na obrázku 3.1 je také vidět větší energetickou bariéru pro díry ve valenčním pásu na levé straně a to je i stejný případ pro elektrony na straně pravé v kombinaci s menší elektronovou afinitou  $\chi_e$  což je vlastně případ energetické bariéry pro elektrony ve vodivostním pásu. K oběma polovodičům jsou připevněné kovové kontakty, které vytváří kontakt s membránami, jak ukazuje obrázek 3.2.



Obrázek 3.2: Kontakty solárního článku

## 3.2 Materiál pro výrobu solárních článků

Materiálem pro výrobu solárních článků je zejména křemík (Si). Jendá se o polovodič s šířkou zakázaného pásu 1,11 eV. Elektrony s menší energií nemohou excitovat a nejsou tedy křemíkem absorbovány. Křemíkové články se dělí na dva druhy. Vyrobené z polykrystalického křemíku a monokrystalického. Polykrystalický křemík je vhodný pro menší výkony, hlavní výhodou je poměrně dobrá účinnost i při nižším osvětlení. Jeho účinnost se pohybuje do 15 %. Monokrystalický křemík s účinností do 17 % je naopak vhodný pro větší výkony. Čistý křemík je velice drahý, proto se využívá i méně čistý křemík, což ale vede ke zhoršení vlastností, hlavně ke snížení účinnosti solárních článků.

Dalším materiálem pro výrobu solárních článků je Arsenid galia (GaAs, příp. GaAs/Ge). Hlavní výhodou je větší účinnost, která se pohybuje až ke 20 %. Nevýhodou je ale mnohem vyšší cena a větší koncentrace GaAs oproti krystalickému

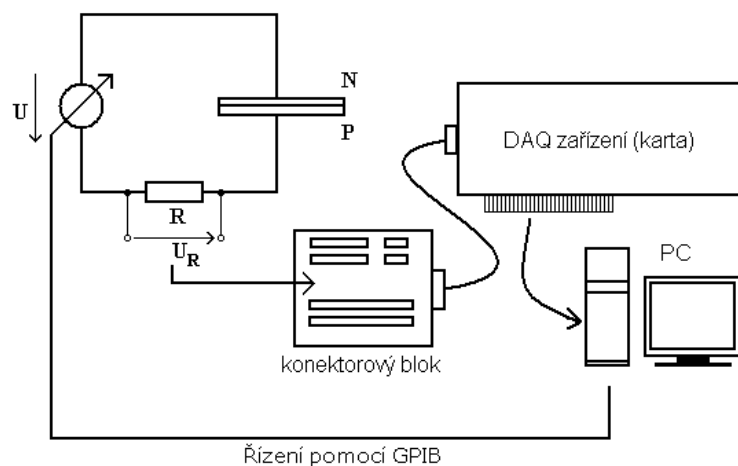
křemíku. Jsou však předpokládány kombinace křemíku a arsenidu galia s jejich očekávanou vyšší účinností a při kombinaci s germániem by mohla být až 30 %.

Další možností je použít Sulfid kademnatý (CdS). Články jsou tvořeny přechodem sulfidu měďného  $\text{Cu}_2\text{S}$  a sulfidu kademnatého CdS a jejich účinnost je přibližně 10 %. Tyto články se pro jejich malou hmotnost používali pro kosmické aplikace, ale z důvodu jejich nestability se již dnes nepoužívají. V kombinaci s teluridem kademnatým (systém CdS - CdTe) se články mohou použít jen pro zařízení s malým příkonem.

## 4 PRACOVISTĚ KONTINUÁLNÍHO MĚŘENÍ

Tato kapitola je zaměřena na sestavení pracoviště pro kontinuální měření za účelem měření šumových charakteristik solárních článků. Jednou ze základních metod užívaných pro šumovou diagnostiku solárních článků je dlouhodobá spektrální analýza, ke které je zapotřebí dlouhých úseků signálu.

Jádrem pracoviště je měřicí karta DAQmx 6251 od firmy National instruments, která je ovládána programem LabVIEW. Tento měřicí systém umožňuje měřit signál vzorkovací frekvencí až 1 MHz. Získané vzorky měřeného signálu jsou ukládány na pevný disk počítače a připraveny k dalšímu zpracování. Principiální schéma zapojení měřicího pracoviště je na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Princip měření kontinuálního pracoviště

Na obrázku 4.1 je naznačeno propojení zdroje s počítačem. Při měření šumu mikroplazmatu solárního článku nestačí jen kontinuálně získávat měřené vzorky, ale aby bylo pracoviště zcela automatické, je zapotřebí ovládat všechny prvky v měřícím obvodu. Toto ovládání zdroje napětí, který je v obvodu zapojen, a také nastavování měřících parametrů zajišťuje program LabVIEW (viz kapitola 4.3).

V uvedeném zapojení je napájecí zdroj připojen k solárnímu článku, který je znázorněn jako PN přechod zapojený v závěrném směru. V tomto případě by neměl obvodem protékat proud. Při výskytu šumu mikroplazmatu, který se projevuje proudovými impulzy, lze na rezistoru měřit úbytek napětí. Nastavuje se tedy napětí zdroje a zároveň se snímá úbytek napětí na rezistoru. Toto napětí je sledováno pomocí měřicí karty DAQmx 6251 a změřené hodnoty jsou ukládány na pevný disk počítače.

## 4.1 Měřicí karta DAQmx 6251

Jádrem měřicího pracoviště je měřicí karta DAQmx 6251 (viz obrázek 4.2) od firmy National instruments. Standardně se spolu s kartou dodává také konektorový blok (viz obrázek 4.3) a propojovací kabel scc-68 mezi kartou a konektorovým blokem, ovladače pro kartu a manuál. Samotná karta se pak připojí k základní desce pomocí PCI slotu.



Obrázek 4.2: Měřicí karta DAQmx 6251

Měřicí karta DAQmx 6251 pochází ze série produktů multifunkčních karet od firmy National instruments označených jako série M. Tato karta podporuje operační systémy Windows Vista/XP/2000, Linux, Mac OS X. Doporučený software je LabVIEW, LabWindows/CVI a Measurement studio. V následujícím textu a práci je využíván software LabVIEW. Lze programovat i v jazyce C++ a Visual Basic 6.0. Karta má 16 analogových vstupů, které vzorkuje do 16 bitů a 2 analogové výstupy, které jsou rovněž v rozlišení 16 bitů. Karta má 6 DMA kanálů pro vysokou propustnost dat. Vstupní rozsah karty je od 100 mV do  $\pm 10$  V. Výrobce udává kalibrační technologii NI-MCal pro lepší měřicí přesnost a kalibrační interval by měl být dva roky.



Obrázek 4.3: Konektorový blok

Konektorový blok je propojen ke kartě pomocí kabelu scc-68, obsahuje 16 analogových vstupů, pro lepší přehlednost je přiložena i přilepovaná legenda s popisem jednotlivých slotů, kterou je možno nalepit na vnitřní stranu krytu.

## 4.2 Instalace karty DAQ - Data Acquisition karta

Instalace se skládá z několika kroků:

1. Nainstalovat software NI LabVIEW
2. Nainstalování ovladačů ke kartě 6251
3. Restart počítače. V tento okamžik je možno PC vypnout a instalovat hardware, tedy zasunout kartu do PCI slotu na desce počítače.
4. Načtení karty v programu - testování funkčnosti. Přesvědčit se, že karta byla rozpoznána spuštěním programu Measurement and Automation, kde je-li načtena měřicí karta, proběhla instalace karty úspěšně.

## 4.3 LabVIEW

Software LabVIEW od firmy National instruments je založen na grafickém programovacím prostředí. Zkratka LabVIEW znamená Laboratory Instrumentation Engineering Workbench, čili se jedná o laboratorní nástroj pro práci s virtuálními nástroji. Odtud Virtual instruments a akronym VI. LabVIEW používá programovací jazyk známý pod názvem „G“, jak už bylo řečeno jedná se o grafické programování, to znamená, že programový kód je v podobě schématu. Program se zpracovává na základě toku dat a ne vykonáváním instrukcí.

Prostředí LabVIEW se skládá ze dvou hlavních částí. Jedná se o tzv. *Přední panel VI*, ve kterém jsou zobrazeny prvky - virtuální nástroje, s kterými uživatel komunikuje při měření. Druhá část se nazývá *Blokový diagram VI* a tvoří jádro programu - je zdrojovým kódem. Zde jsou propojeny jednotlivé objekty tzv. uzly pomocí propojovacích vodičů (hrany). Uzly, které odpovídají jednotlivým nástrojům v předním panelu, s nimi mají shodné jméno.

## 4.4 Uživatelské prostředí měření

Měřicí karta je schopna kontinuálního měření vstupního signálu s vzorkovací frekvencí až 1 MHz. Pro spektrální analýzu je třeba daný vzorek solárního článku změřit ve

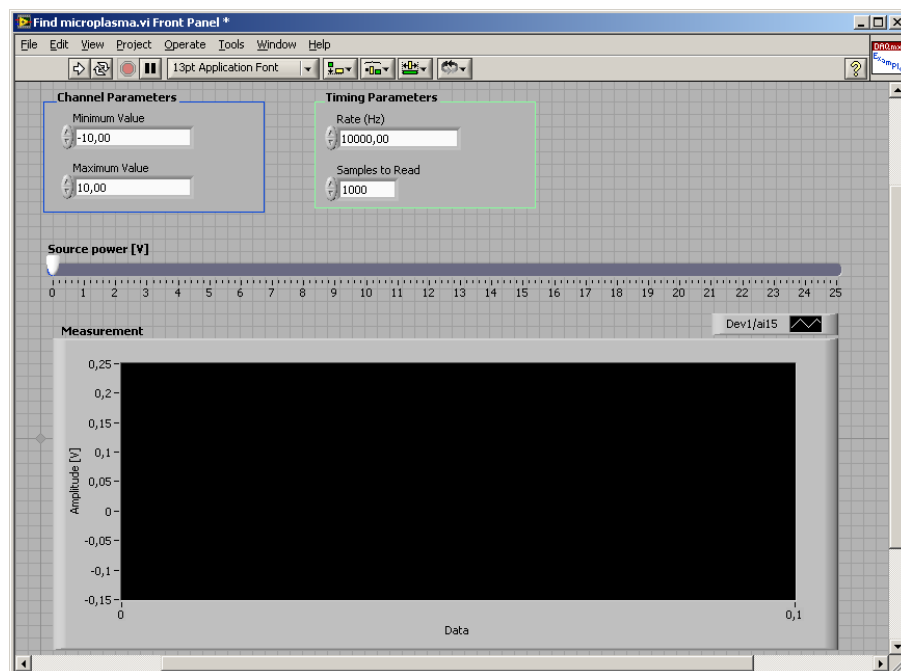
velkém rozsahu vzorkovací frekvence. Ze získaných dat pak provést rychlou Fourierovu transformaci (Dále jen FFT), ze které je pak vypočtena spektrální výkonová hustota měřeného signálu. Úkolem je sestavit program, pomocí kterého bude probíhat měření pro více vzorkovacích frekvencí, pro více realizací při dané frekvenci a změřená data se budou ukládat na disk. Prakticky to znamená, že se na oblasti s šumem mikroplazmatu provede 100 krát měření při jedné vzorkovací frekvenci a data získané z jednotlivých měření se uloží na disk do příslušných souborů pod názvem aktuální vzorkovací frekvence a číslem měření. Z jednotlivých realizací se pak vypočítají výkonové spektrální hustoty a z nich se spočítá průměr. Tato metoda se nazývá kumulační metoda měření, pomocí které se odstraní parazitní šumové vzorky. Dále se provede měření s jinou vzorkovací frekvencí a celý postup se opakuje. Pro dostatečný popis měřeného signálu ve frekvenčním spektru se bude rozsah frekvencí pohybovat od 10 do 1 MHz. Získaných šest průběhů spektrálních hustot se v konečné fázi spojí a tím se získá celková frekvenční analýza daného měřeného vzorku. Snahou je, aby měřicí systém pracoval samostatně a uživatel by zpracovával změřená data uložená v příslušných souborech až po změření dané oblasti pro všechny frekvence.

#### 4.4.1 Aplikace pro zjištění defektní oblasti PN přechodu

Za předpokladu zkoumání neznámého vzorku solárního článku není známo, kde se lokální průrazy PN přechodu nachází a je zapotřebí tyto oblasti nejdříve nalézt. K tomu byl vytvořen měřicí program, který v závislosti na závěrném napětí vykresluje měřená data v oblasti grafu (viz obrázek 4.4). Hodnota zdroje se nastavuje manuálně přímo za běhu aplikace. V okamžiku objevení rozsahu, případně více rozsahů, závěrného napětí, při kterých se šum mikroplazmatu vyskytuje, lze přistoupit k podrobnému měření na daném rozsahu napětí (viz obrázek 4.6).

V aplikaci pro zjištění defektní oblasti daného vzorku se napětí zdroje nastavuje tahem pomocí ovládacího prvku *Power*. Tomu odpovídá stejnojmenný uzel v blokovém schématu, který řídí zdroj napětí pomocí ovládacího nástroje *Instrument I/O Assistant*, který komunikuje se zdrojem přes GPIB port.

Zdroj napětí Aligent E3649A nabízí možnost výběru mezi dvěma rozsahy napětí a to 0 - 6 V a 0 - 25 V. Nejdříve se tedy musí určit, který zdroj napětí se bude využívat a dále jaké napětí se na něm má nastavit. Pomocí příkazu „appl p25V,5.2“ se vybere zdroj 0 - 25 V a nastaví se na něm napětí 5,2 V. Aby nedošlo nenadálému zvýšení odběru proudu, nastaví se maximální proud dodávaný zdrojem do obvodu na 3 mA pomocí příkazu „curr 0.003“. Nástroj Instrument I/O Assistant umožňuje posílat tyto příkazy ke zdroji samostatně, nebo lze přidat zápis příkazu jako vstupní parametr. V našem případě se hodnota maximálního dodávaného proudu nastavuje automaticky a je přidán pouze vstup pro ovládání vstupního napětí (viz příloha

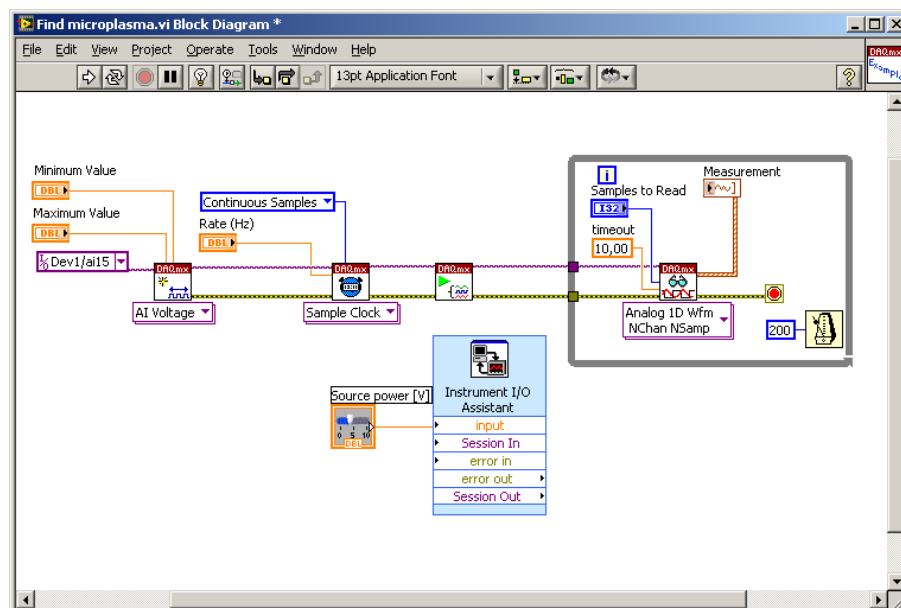


Obrázek 4.4: Přední panel aplikace nalezení šumu mikroplazmatu

A.1).

Před spuštěním měření úbytku napětí na rezistoru se musí nastavit časové parametry (Timing Parameters) a parametry vstupního analogového kanálu měřící karty (Channel Parameters). V oblasti parametrů kanálu se nastaví maximální rozsah vstupního napětí. Vzorkovací frekvenci v oblasti časových parametrů lze nastavit až do hodnoty 1 MHz. Pole Samples to read určuje po jak velkém množství budou načítány snímané vzorky a zobrazeny v oblasti grafu.

Zdrojový kód programu je uveden ve formě blokového schématu na obrázku 4.5. Po spuštění aplikace se nejprve vytvoří vstupní analogový měřící kanál s parametry zadanými uživatelem a vstupní data očekává na jednom z 15 vstupních analogových kanálů. Defaultně je nastaven vstupní kanál a/i15, na kterém je připojeno napětí snímané na odporu  $R$ . Dále se nastaví hodnoty vzorkovací frekvence a vzorkovací režim nastavený na defaultní hodnotu kontinuální získávání vzorků. Nyní se inicializuje spuštění měření a získávání vzorků, které se děje ve smyčce „while“, která je zastavena až stisknutím ukončení běhu aplikace nebo chybovým hlášením. V každém cyklu se určuje kolik vzorků - „Samples to read“ se bude načítat v jedné smyčce a zároveň po tomto množství se tyto vzorky vykreslují v každé iteraci do oblasti grafu. Samples to read tedy určuje počet vzorků, po kterém se budou data v paměti přepisovat.

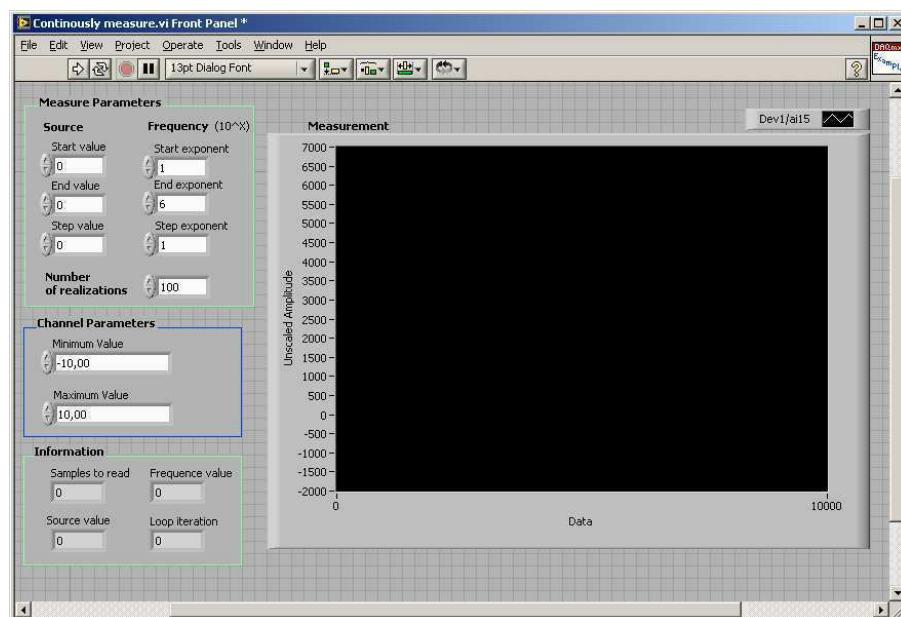


Obrázek 4.5: Blokový diagram aplikace nalezení šumu mikroplazmatu

#### 4.4.2 Aplikace podrobného měření na daném rozsahu

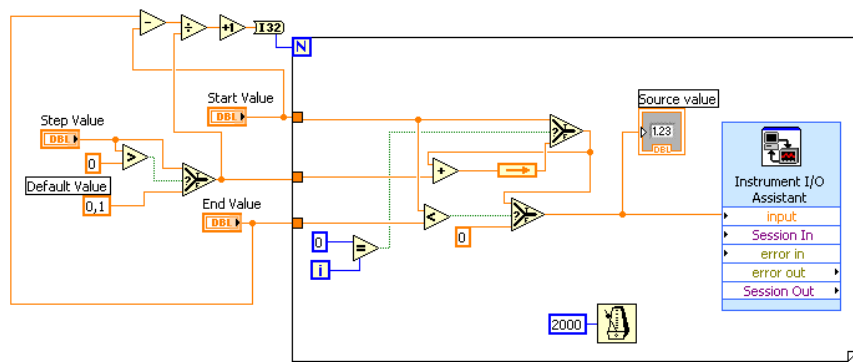
S nalezením defektní oblasti PN přechodu lze přistoupit k podrobnému měření s užitím více vzorkovacích frekvencí a s ukládáním měřených dat na pevný disk počítače. V tomto programu je zajištěno plně automatické měření, ve kterém se nastaví pouze rozsah napětí, při kterém se nachází šum mikroplazmatu, rozsah vzorkovacích frekvencí a vlastnosti vstupního analogového kanálu jako v předchozím případě a stejně tak i počet vzorků pro čtení a zápis. Je možno nastavit i počet realizací měření  $N$ . Defaultně je tato hodnota nastavená na 100 opakování. Celá oblast se tedy na daném rozsahu napětí změří pro 100 realizací při jedné vzorkovací frekvenci. Pro získání frekvenční analýzy je vhodné měřit na defektní oblasti s více vzorkovacími frekvencemi a následně z jednotlivých časových průběhů získané výkonové hustoty spojit za účelem přesné analýzy pro celý rozsah frekvencí. Proto se měření po 100 realizacích opakuje pro následující vzorkovací frekvenci. Změřená data z dílčích měření jsou ukládána do příslušných souborů na pevný disk a po ukončení měření jsou připravena k dalšímu zpracování. Blokové schéma je uvedeno v příloze A.2.





Obrázek 4.6: Přední panel aplikace podrobného měření na dané oblasti

Jak již bylo uvedeno, napětí zdroje se neovládá manuálně, ale zadáním hodnot v oblasti „Measure Parameters“. Nastaví se počáteční a koncová hodnota napětí, kterými je ohraničena daná oblast. Další možností je nastavit krok, po kterém bude napětí na zdroji narůstat. Bude-li toto pole prázdné, bude se hodnota napětí navyšovat po defaultně nastaveném kroku 0,1 V.



Obrázek 4.7: Princip řízení zdroje napětí - zdrojový kód

Řízení zdroje je znázorněno na obrázku 4.7. Hodnota napětí na zdroji se nastavuje v jednotlivých měřicích cyklech. Počet těchto opakování smyčky *For Loop*, která se provede přesně  $N-1$  krát, se vypočítá ze vstupních hodnot počáteční a koncové hodnoty a hodnoty kroku, po kterém se bude napětí měnit dle následujícího

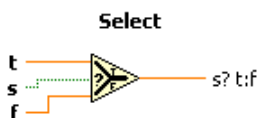
vzorce:

$$N = \frac{V_E - V_S}{S} + 1 \quad (4.1)$$

kde  $N$  je počet opakování smyčky *For loop*,  $V_E$  je koncová hodnota napětí zdroje (End Value),  $V_S$  je počáteční hodnota napětí zdroje (Start Value) a  $S$  je krok po kterém se napětí zdroje navyšuje (Step Value).

Výsledná hodnota se přivede na vstupní terminál smyčky. Aktuální opakování smyčky udává terminál  $i$ , jehož hodnota může nabývat od 0 do  $N - 1$ . Jakmile se dosáhne stavu  $i = N - 1$ , cyklus *For Loop* se ukončí. Uvnitř smyčky se v každém opakování porovnává aktuální hodnota opakování cyklu  $i$  s hodnotou 0. Vyjde-li z této rovnosti, že  $i = 0$ , pak to znamená, že probíhá první iterace cyklu *For Loop* a ke zdroji je přivedena hodnota „Start Value“. V dalších opakováních již nebude platit rovnost  $i = 0$  a k Instrument I/O Assistant bude přivedena poslední hodnota k němu vedená navýšená o hodnotu „Step Value“. Program navíc obsahuje podmínku, že počáteční hodnota napětí musí být menší než hodnota napětí zdroje. V opačném případě se na zdroj nastaví hodnota 0.

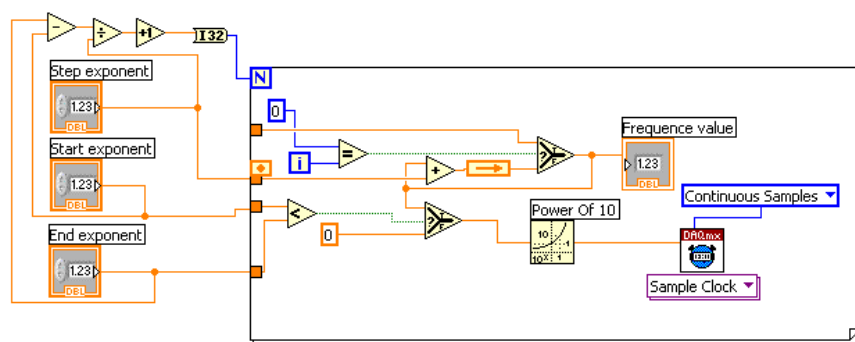
Na obrázku 4.8 je zobrazen rozhodovací člen z blokového schématu řízení zdroje. Je-li na jeho vstup „s“ přivedena logická hodnota TRUE, na svůj výstup propustí data která jsou připojená na vstup „t“. V opačném případě na svůj výstup propustí data připojená na vstup „f“. Toho se využívá při rozhodování přivedení hodnot ke zdroji a také při ověřování, zda-li je nastavena hodnota „Step Value“.



Obrázek 4.8: Uzel Select

Řízení vzorkovací frekvence lze uskutečnit podobně jako navyšování hodnoty zdroje napětí. Rozdíl je ve způsobu nárůstu hodnoty frekvence. Zatímco u řízení zdroje se měnila hodnota lineárně, u nastavování frekvence se bude hodnota měnit exponenciálně. Nastaví se počáteční a konečná hodnota exponentu. Krok, po kterém bude exponent narůstat je defaultně nastaven na hodnotu 1.

Hodnota aktuální vzorkovací frekvence je vedena do bloku „Samples Clock“, ve kterém se nastavují časové parametry měření (viz kapitola 4.4.1).

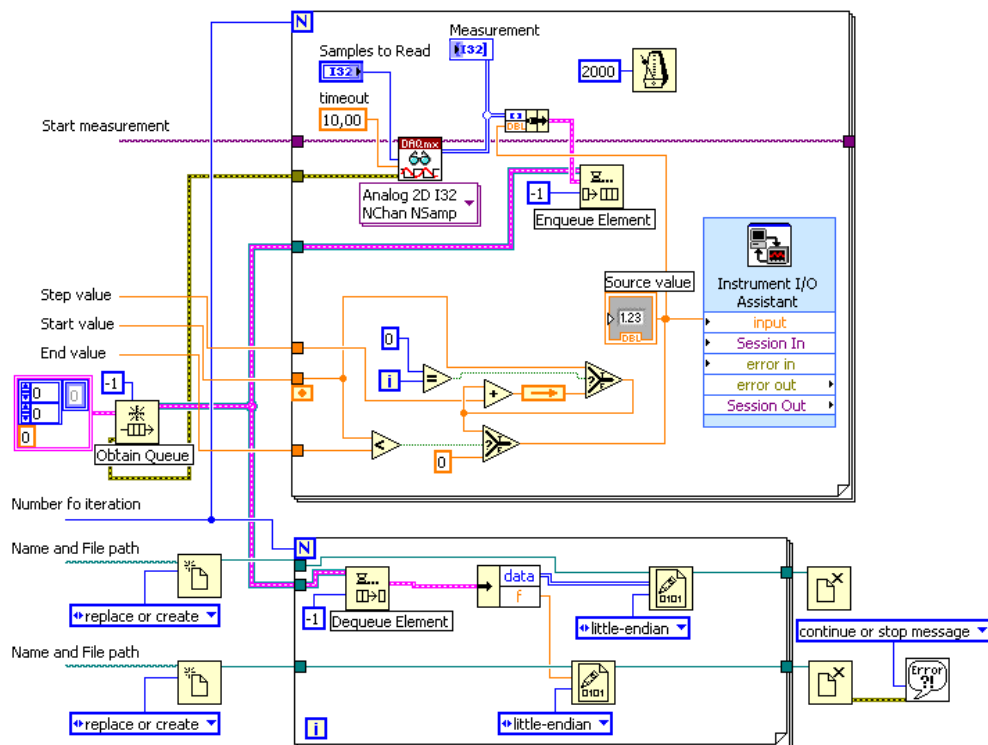


Obrázek 4.9: Princip navyšování vzorkovací frekvence - zdrojový kód

Ukládání měřených vzorků do souboru přináší několik problémů, na které je třeba brát zřetel. Při vyšších vzorkovacích frekvencích dochází k zahlcení měřicího systému. Z důvodu velkého množství změřených dat dochází k přepisováním starých vzorků v paměti nově příchozími. Částečným řešením tohoto problému je vhodná volba hodnoty „Samples to read“. Bude-li tato hodnota příliš nízká, bude docházet jednak k tomu, že vykreslovaný signál v oblasti grafu nebude dostatečně vypovídat o měřeném signálu, ale také k zahlcení systému. To proto, že jakmile se data ukládají po příliš malém množství, o to více častěji se musí zapisovat, což vyžaduje více systémových prostředků. Z hlediska rychlosti zápisu program nestíhá a opět dochází k přepisováním starých vzorků v paměti nově příchozími a program vrací chybové hlášení a nelze pokračovat v měření z důvodu ztráty vzorků.

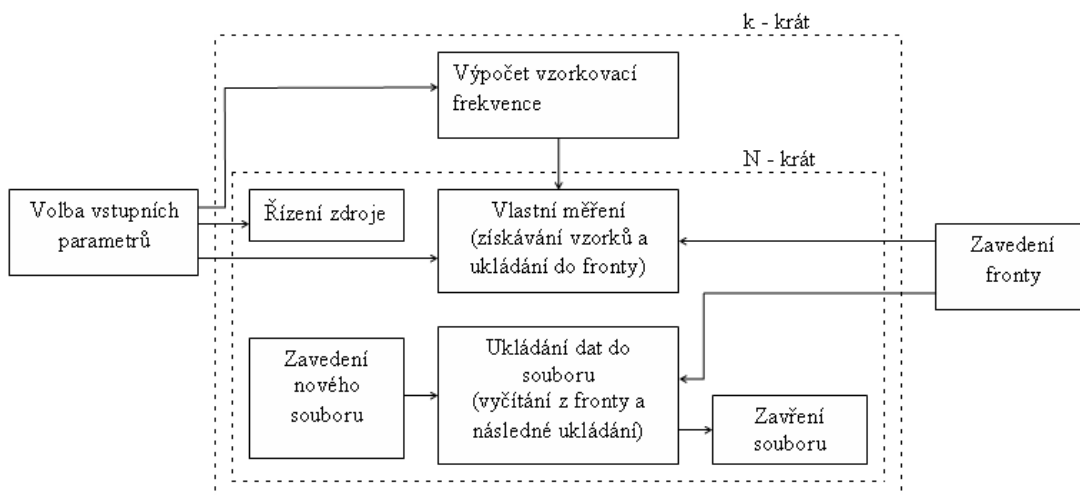
Řešením tohoto problému je zařazením vstupní vyrovnávací paměti před zapisováním dat na disk, tak jak je uvedeno v blokovém diagramu zobrazeném na obrázku 4.10. Po spuštění měření se načítají vzorky neustále ve smyčce. Získané vzorky se jednak zobrazují v grafické podobě a jednak jsou na cestě do vyrovnávací paměti, aby se předešlo přepisování dat při zápisu do souboru, nově příchozími daty, ještě předtím než se stihnou současné vzorky řádně zapsat. K tomu je potřeba využít uzel fronty, což je paměť typu FIFO, která zároveň slouží k přechodu mezi dvěma okny VI nebo dvěma smyčkami. Jde o to, že pomocí fronty se mohou data na jednom místě do fronty uložit a na jiném místě pak z fronty vyčíst. Tohoto se dá využít jako vyrovnávací paměti. Používají se k tomu prvky fronty (Queue) a to sice obstarání fronty - „Obtain Queue“, zápis do fronty - „Enqueue Element“ a odebrání z fronty - „Dequeue Element“.

Jelikož měření bude probíhat v několika cyklech, je nutné tyto soubory rozlišit a proto jsou názvy souborů vzniklých z jednotlivých měření složeny z „aktuální vzorkovací frekvence + číslo měření“. Toto je vyřešeno pomocí spojení dvou řetězců vzniklých v každé iteraci měřicí smyčky. Kde číslo měření je  $i$  - té opakování cyklu „For Loop“. Takto získaný název souboru se přivede na vstupní kanál „file path“ uzlu „Open/Creat/Replace File“, který vytvoří soubor na požadovaném místě se zadaným názvem. Změřená data se zapisují do binární pomoci uzlu „Write to Binary File“.



Obrázek 4.10: Princip ukládání dat do souboru - zdrojový kód

Jak již bylo zmíněno dříve, měření probíhá v několika opakováních. Nejdříve se nastaví vzorkovací frekvence a při této frekvenci se změří šum solárního článku 100 -krát na daném rozsahu. Po té se nastaví nový vzorkovací kmitočet a měření opět proběhne 100 -krát. To se opakuje v rozsahu frekvencí  $10^1$  Hz až  $10^6$  Hz. Toto opakování je zajištěno nastavením počtem opakování dané smyčky „For Loop“ jak je vidět na celkovém blokovém diagramu, uvedeném v příloze A.2, které tvoří celkový kód měřicího programu.



Obrázek 4.11: Blokové schéma programu kontinuálního měření

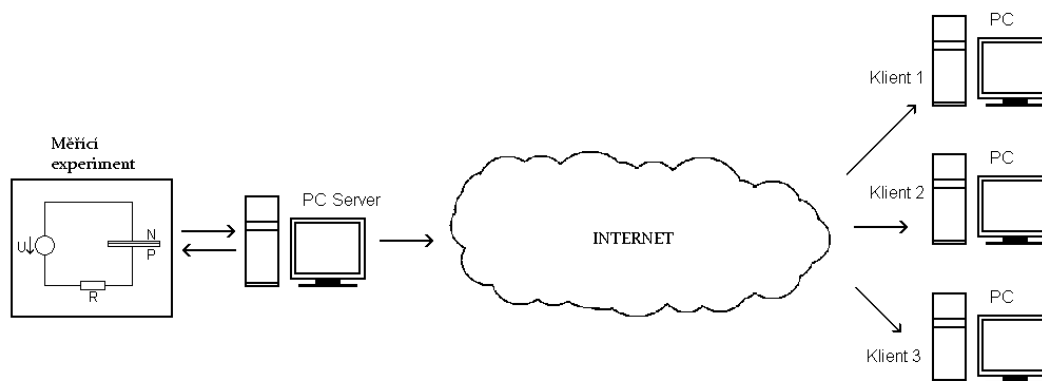
Pro orientaci jak program pracuje, je na obrázku 4.11 uvedeno jeho blokové schéma, kde  $k$  je počet nastavovaných frekvencí a  $N$  je počet měření pro dané frekvence. V tomto případě je pro rozsah vzorkovacích frekvencí  $10^1$  až  $10^6$  Hz  $k = 6$  a  $N = 100$ .

## 5 VZDÁLENÁ LABORATOŘ

Vzdálená laboratoř je aplikace, umožňující měřit zapojenou úlohu v laboratoři ze vzdáleného počítače přes webový prohlížeč. To lze realizovat mnoha způsoby, mimo jiné i pomocí LabVIEW. Je ovšem nezbytné nainstalování volně stažitelného zásuvného modulu RunTimelabVIEW na daném PC. Vzdálené laboratoře poskytují možnost měření 24 hodin denně. Široká možnost využití vzdáleného měření nabízí připojit se a měřit danou úlohu přímo z domova, nebo třeba demonstrovat úlohu v přednáškové učebně, či zpřístupnit měřicí aplikaci veřejnosti.

### 5.1 LabVIEW vzdálená laboratoř

V prostředí LabVIEW existuje nástroj **web publishing tool** a **remote panel** s jejichž pomocí lze snadno tyto možnosti realizovat. Nástroj web publishing spustí server na počítači zapojeném v měřicí úloze a publikuje přední panel naší měřicí aplikace na webovou stránku. Uživatel na vzdáleném PC tak může přímo zadávat měřicí podmínky a spustit měření přes webový prohlížeč. Pomocí nástroje „Remote panel“ lze dohlížet nad připojením, měnit ovládání úlohy mezi klientem a serverem, nastavovat přístupová hesla, případně ukončit spojení klient-server.

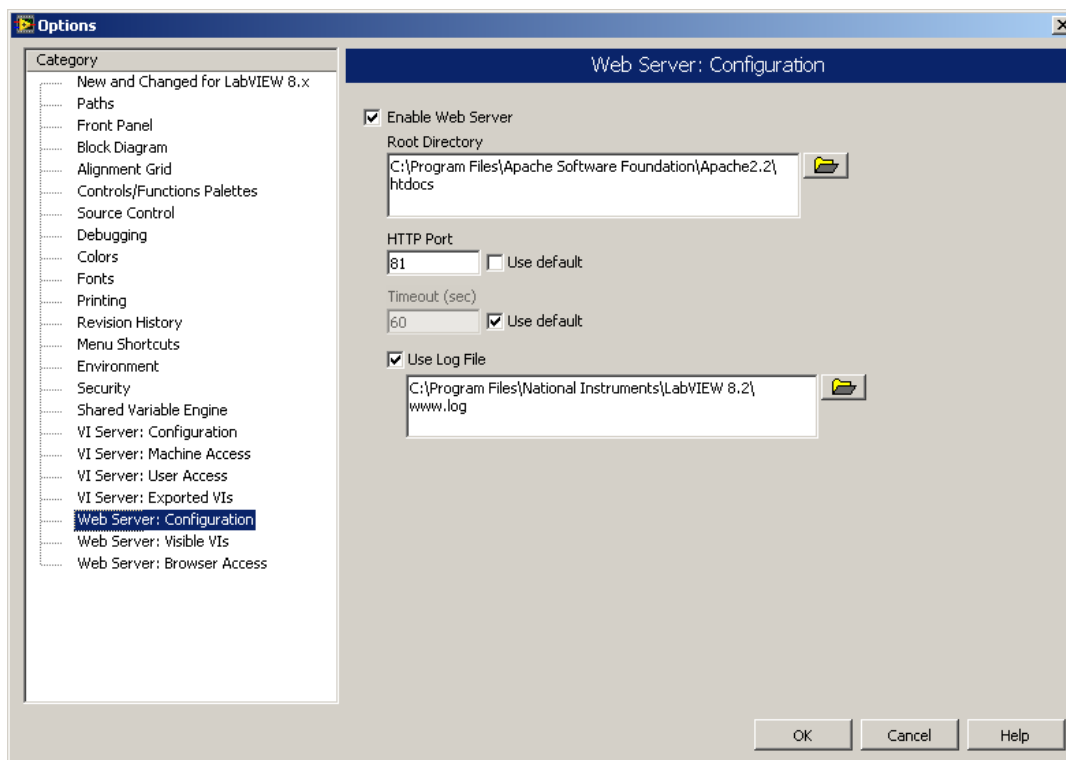


Obrázek 5.1: Vzdálená laboratoř

### 5.2 Spuštění serveru vzdálené laboratoře

Pro zveřejnění měřicí aplikace je nejdříve třeba nastavit server LabVIEW. Toto nastavení se nachází v LabVIEW Menu → Tools → Options. Po zvolení položky „Web Server: Configuration“ je možno nastavit výchozí složku - „Root Directory“, do které se uloží vygenerovaná webová stránka (například „RemoteMeasure.html“).

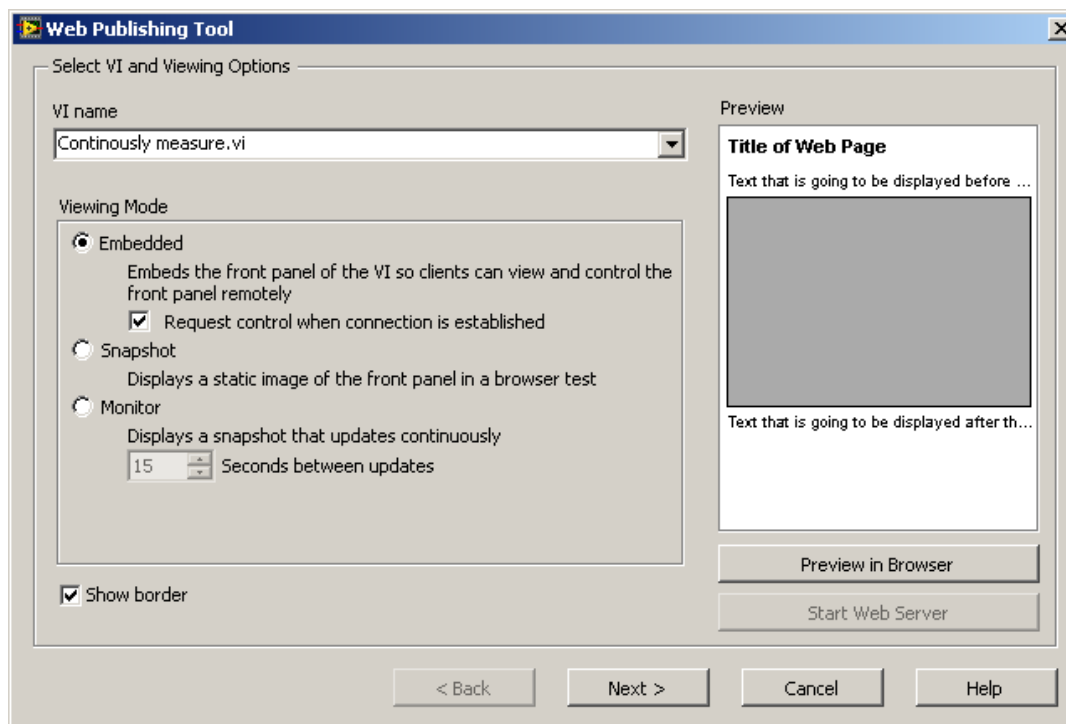
Jak lze vidět na obrázku 5.2 kořenovým adresářem je zároveň kořenový adresář pro webový server Apache. Jelikož vygenerovanou stránku programem LabVIEW není vhodné upravovat podle potřeb, jako je například vkládání obrázků apod., je spuštěn na měřicím pracovišti webový server Apache, na kterém se prezentují stránky vzdálené laboratoře včetně návodu na obsluhu a spuštění vlastního měření je dostupné pomocí odkazu umístěného na prezentačních stránkách (viz příloha B).



Obrázek 5.2: Nastavení LabVIEW serveru pro vzdálenou laboratoř

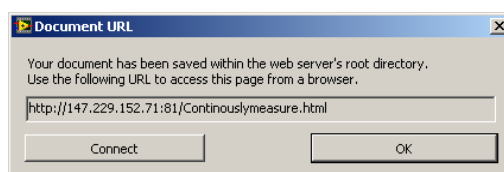
V nastavení serveru se musí změnit port na kterém tato aplikace běží z defaultní hodnoty 80 na hodnotu 81, protože port 80 je již obsazen webovým serverem Apache.

Spuštění LabVIEW serveru se provede v menu → Tools → „Web Publishing Tools“ jak ukazuje obrázek 5.3.



Obrázek 5.3: Dialogové okno pro povolení vzdálené laboratoře

Na obrázku 5.3 a 5.4 je znázorněno povolení vzdáleného ovládání předního panelu měřící aplikace. Nejdříve se vybere výběr požadované aplikace a dále zvolením položky **embedded** se umožní vzdálenému klientovi vidět a také ovládat její přední panel. V dalším kroku umožňuje nástroj Web Publishing Tool vytvoření titulku webové stránky a přidání krátkého popisku nad i pod měřící okno. Stisknutím tlačítka finish se objeví vygenerovaná URL adresa zvolené aplikace a dojde ke spuštění serveru.

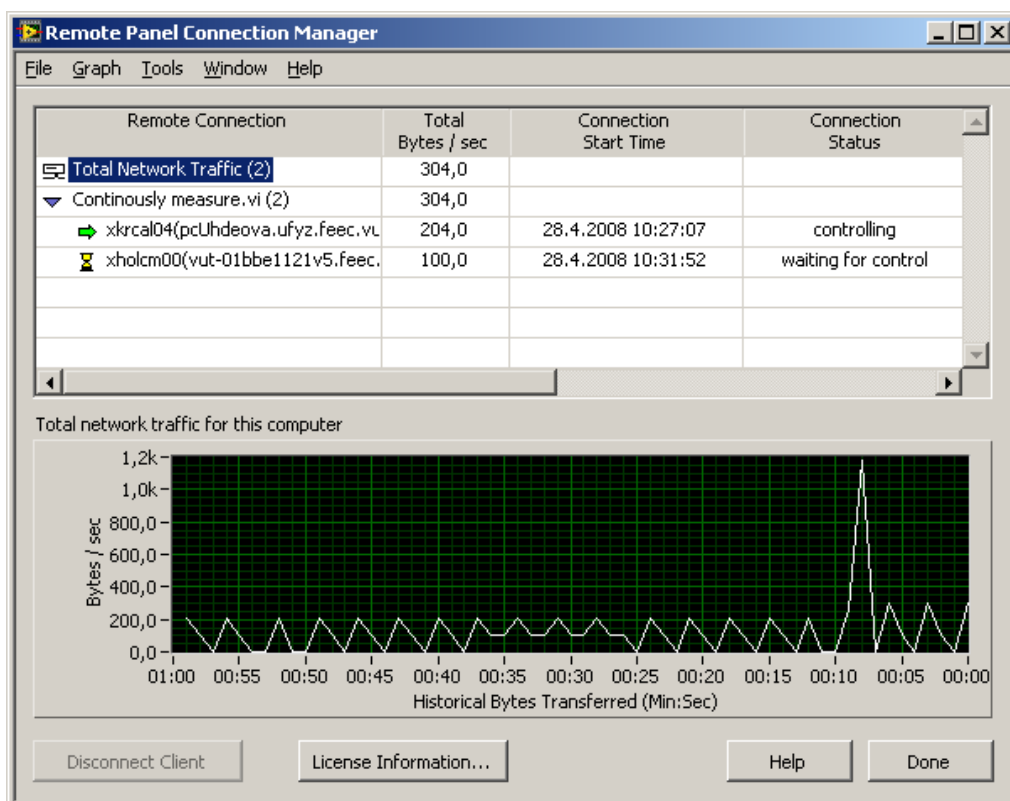


Obrázek 5.4: URL adresa aplikace vzdálené laboratoře

Takto je možno umístit na webové stránky více úloh, které jsou dostupné pod svou URL adresou. Na webových stránkách, které jsou umístěny na počítači v laboratoři šumové diagnostiky na Ústavu fyziky jsou takto prezentovány dvě měřící úlohy a to aplikace nalezení šumu mikroplazmatu a podrobné měření na dané oblasti. Adresa, na které jsou dostupny prezentační stránky a kde je taktéž možno vzdáleně



měřit aktuálně zapojený vzorek solárního článku je *http : //147.229.152.71*. Vzhled stránek zachycuje příloha B.



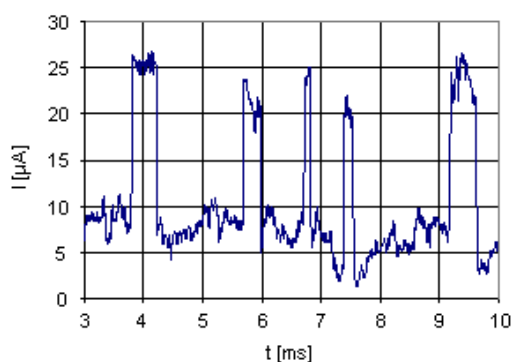
Obrázek 5.5: Remote panel

Informace o aktuálním připojení lze kontrolovat a ovládat pomocí nástroje „Remote panel“, který je uveden na obrázku 5.5. Jakmile se klient připojí, automaticky se spustí jeho monitorování. Uživatel tak může přepínat ovládání mezi serverem a klientem nebo ovládání ze strany klienta zakázat a nechat mu práva pouze pro prohlížení, či jej úplně odpojit. Vzdálená laboratoř umožňuje připojení více uživatelů. Připojí-li se k jedné aplikaci více klientů, právo na ovládání má pouze klient, který se přihlásil jako první a ostatní čekají v režimu prohlížení až aktuální klient opustí režim ovládání.

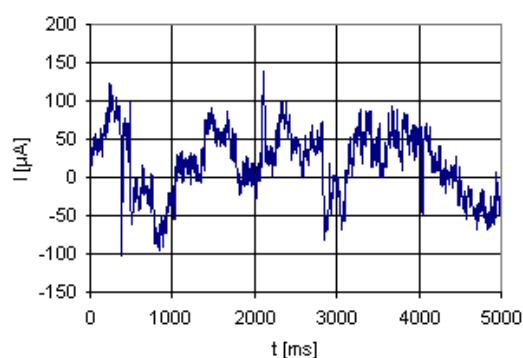
Aby mohl klient, který ukončí měření, dále zpracovávat změřená data, je na počítači v laboratoři spuštěn ftp server, z kterého je možno soubory stáhnout.

## 6 MĚŘENÍ ŠUMOVÝCH A TRANSPORTNÍCH CHARAKTERISTIK

Kvůli velké ploše přechodu solárních článků a značnému množství defektů je velmi obtížné analyzovat získaný šum a identifikovat jednotlivé šumové zdroje. Proto jsou velmi často ke studiu používány pouze části celých článků. Experimenty ukázaly, že lze pozorovat dva typy šumu. Typ A (šum mikroplazmatu) je zobrazen na obrázku 6.1. Typ B je zobrazen na obrázku 6.2. Tento typ šumu je výsledkem lokálních tepelných průrazů PN přechodu [10].



Obrázek 6.1: Šum typu A



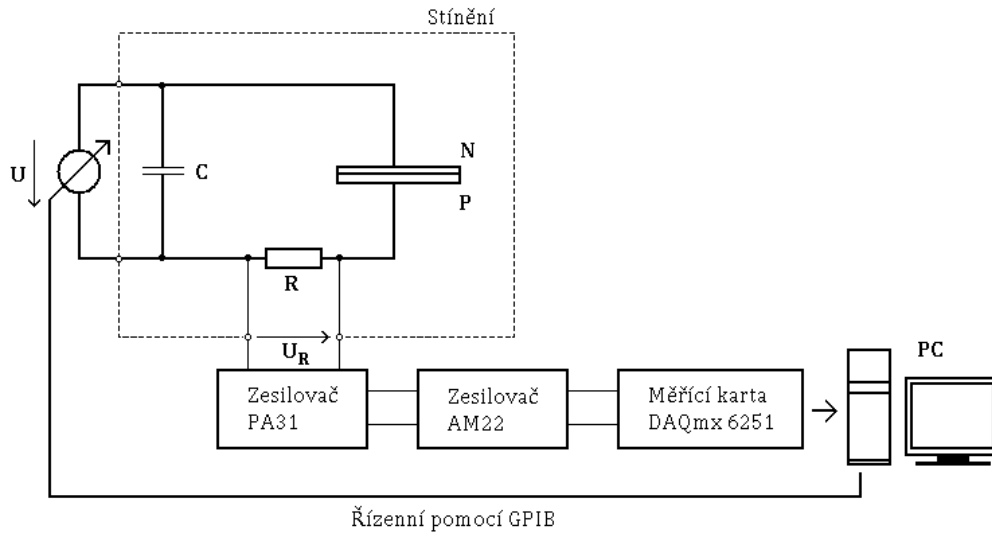
Obrázek 6.2: Šum typu B

Tyto typy šumu lze nalézt a zkoumat různými metodami měření. První metodou je měření průběhu napětí šumového signálu. Výsledkem je šumová charakteristika. Z ní je následně možné získat další informace o typu šumu nebo rozložení výkonu šumu ve spektru. Další metodou je pak měření transportních charakteristik, které udávají závislost šumového a závěrného nebo propustného proudu na přiloženém napětí v závěrném nebo propustném směru. Jako nejefektivnější metoda se jeví detekce efektivní hodnoty šumového proudu v závislosti na přiloženém závěrném napětí. Tato metoda slouží pouze k detekování lokálních průrazů PN přechodu a lze jí určit i jejich počet.

### 6.1 Šumové charakteristiky solárních článků

Pro měření šumových charakteristik defektní oblasti PN přechodu je využito automatické pracoviště kontinuálního měření. Pro měření byl vybrán vzorek označen názvem K1. Nejdříve bylo potřeba nalézt defektní oblast PN přechodu pomocí měřicího programu „Find microplasma.vi“ a poté tuto oblast důkladně prozkoumat s využitím

programu „Continously measure.vi“, který již zajišťuje automatické kontinuální měření. Schéma zapojení měřicího pracoviště je uvedeno na obrázku 6.3.



Obrázek 6.3: Schéma měřicího pracoviště

Solární články jsou vloženy mezi dvě elektrody, na které je přivedeno závěrné napětí ze zdroje Agilent E3649A. Z důvodu snížení rušení je solární články spolu s odporem a kondenzátorem vloženy do kovové skřínky, která obvod odstíní od elektromagnetického záření. Měřicí zesilovače jsou napájeny vlastními bateriemi, aby se odstranilo rušení z elektrické sítě. Zesílení zesilovače PA31 je nastaveno na 20 dB, čili zesílí signál 10-krát a zesilovač AM22 zesílí 100-krát, čili zesílení 40 dB. Kondenzátor  $C$  ( $470\ \mu\text{F}/40\ \text{V}$ ), který slouží k dočasnému uchování elektrického náboje a tím i k uchování elektrické energie, vyhladí kolísání napětí zdroje. Rezistor  $R$  ( $5\ \Omega\ 5\ \text{W}$ ) má přesnou hodnotu odporu  $5,517\ \Omega$ . Propojení součástí měřicího obvodu je pomocí stíněných kabelů zakončených konektory BNC.

### 6.1.1 Frekvenční filtry

Před spuštěním měření je třeba vzít v úvahu vzorkovací teorém, který uvádí podmínku pro minimální velikost vzorkovacího kmitočtu, aby nedocházelo k antialiasingu. Pro vzorkovací kmitočet musí platit [2]:

$$f_{vz} = 2 \cdot f_{max} \quad (6.1)$$

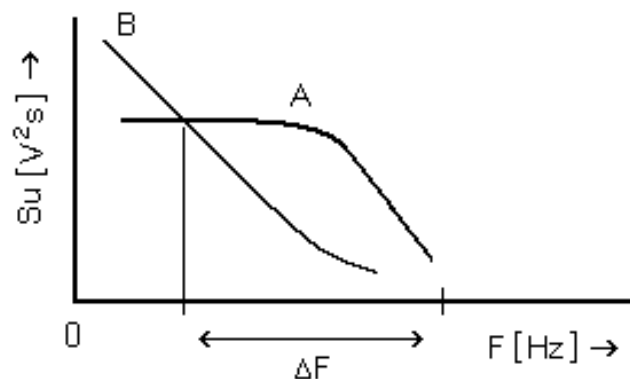
Kde  $f_{vz}$  je vzorkovací kmitočet,  $f_{max}$  je maximální hodnota kmitočtu obsaženého v měřeném signálu.

K dodržení vzorkovací podmínky je využit výstupní filtr zesilovače AM22, na kterém je možno nastavit dolní i horní propust a s využitím obou i propust pásmovou.

Rozsah pásmové propusti je od 0,03 Hz do 300 kHz. Při měření danou vzorkovací frekvencí je tedy zapotřebí vždy nastavit hodnotu dolní propusti.

Protože úkolem bylo měření šumu mikroplazmatu (typ A), bylo vhodné vyloučit, nebo pokud možno alespoň co nejvíce omezit vliv ostatních typů šumů, které na PN přechodu vznikají. Je známo, že výkonová spektrální hustota šumu vzniklého v důsledku tepelných lokálních průrazů (šum typu B) má charakter typu  $1/f$ . Ten se projevuje pro nízké frekvence a následně klesá exponenciálně rychlostí  $1/f$ . Proto se tento typ šumu částečně eliminuje zařazením filtru horní propusti. Hodnota mezního kmitočtu je nastavena na 3 Hz, protože pro vyšší hodnoty je průběh šumu mikroplazmatu zkreslený. Byla tedy použita pásmová propust s dolním mezním kmitočtem 3 Hz a horním mezním kmitočtem závislým na vzorkovací frekvenci.

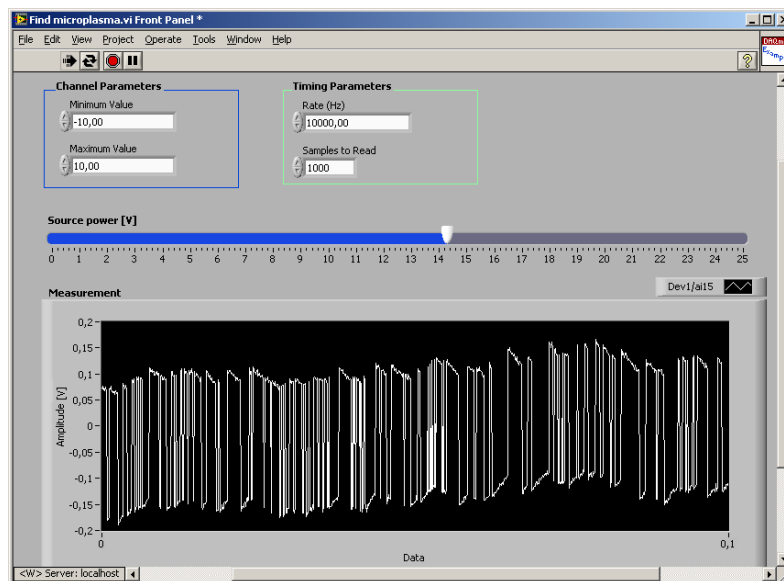
Na obrázku 6.4 je vidět průběh spektrální hustoty šumu typu B a šumu typu A. Šum typu B s rostoucí frekvencí klesá v závislosti na rostoucí frekvenci. Šum typu A klesá od přelomového bodu značeným  $f_0$  stejnou rychlostí jako typ B a to  $1/f$ , což je charakter generačně - rekombinačního šumu. Dále je na obrázku vyznačeno frekvenční pásmo pásmové propusti.



Obrázek 6.4: Spektrální hustota pro šum typu A a B

### 6.1.2 Nalezení defektní oblasti PN přechodu

K nalezení defektní oblasti PN přechodů lze použít v rámci této práce vytvořený program „Find microplasma.vi“. Po jeho spuštění se zobrazí měřicí prostředí (viz 6.5), ve kterém se nastavuje hodnota napětí zdroje manuálně pomocí posuvníku („Horizontal pointer slide“) a měřené hodnoty se okamžitě vykreslují v oblasti grafu („Measurement“). Postupným zvyšováním napětí a sledováním úbytku napětí na odporu je nalezena oblast s šumem mikroplazmatu a to mezi hodnotou zdroje 14 V a 14,5 V.



Obrázek 6.5: Přední panel programu nalezení šumu mikroplazmatu

Při získávání vzorků měřicí kartou DAQmx jsou data kvantována do 16 bitů, tedy do 65536 úrovní, respektive 32768 urovní pro každou polaritu. Tyto úrovně jsou v aplikaci hledání defektní oblasti PN přechodu přepočítány, v závislosti na volbě maximálního napětí vstupního analogového kanálu měřicí karty, na jejich reálné hodnoty dle (6.2).

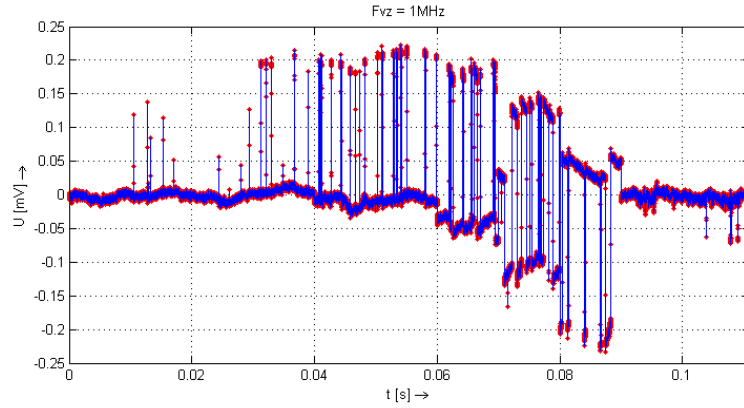
Kvantovaný vzorek  $y$  do úrovně  $x = 6000$  bude mít pak při rozsahu napětí vstupního kanálu  $\pm 10V$  hodnotu:

$$y = x \cdot \frac{\Delta U}{2^n} = 6000 \cdot \frac{20}{65536} \cong 1,831V \quad (6.2)$$

kde  $y$  je reálná úroveň získaného vzorku,  $x$  je hodnota vzorku po kvantování v dekadickém tvaru,  $\Delta U$  rozsah vzorkovaného napětí,  $n$  je počet bitů pro kvantování.

### 6.1.3 Podrobné měření na defektní oblasti - časový průběh

Se spuštěním programu Continously measure.vi (viz obrázek 4.6) může začít měření na daném rozsahu napětí s ukládáním dat na pevný disk. Do oblasti „Measure Parametres“ se dosadí získané hodnoty z předešlého měření, tedy pole „Start Source Value“ bude obsahovat hodnotu 14 V, pole „End Source Value“ 14,5 V. Hodnota inkrementu se nastaví na 0,05 V. Dále se nastaví rozsah vzorkovací frekvence a stisknutím tlačítka „Run“ v horní části panelu se spustí měření vzorkovací frekvencí 10 Hz a získané vzorky se ukládají na disk. Měření probíhá stokrát a to pro šest vzorkovacích frekvencí postupně se logaritmicky zvyšujících až do 1 MHz. Po změření všech 600 měřících cyklů je program automaticky zastaven.



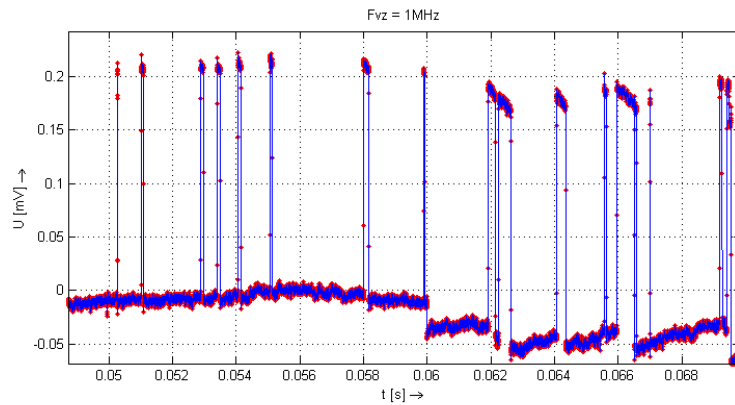
Obrázek 6.6: Průběh šumu mikroplazmatu,  $F_{vz} = 1 \text{ MHz}$ ,  $U_R = 14,3 \text{ V}$

V této aplikaci nejsou kvantované vzorky přepočítány na reálné hodnoty a jsou ukládány jako „unscaled data“ na pevný disk. To z důvodu urychlení ukládání a předejití přepisování nově příchozích vzorků. Proto je třeba při pozdějším zpracování hodnoty vzorků přepočítat dle vzorce 6.2. Protože jsou hodnoty vzorků ukládány v diskrétním čase, jsou zpět přepočítány do časové oblasti dle následujícího vzorce:

$$t = \frac{1}{f_{vz}} \cdot (N - 1) \quad (6.3)$$

kde  $t$  je doba trvání signálu,  $f_{vz}$  je vzorkovací frekvence měřeného signálu,  $N$  je délka diskrétního signálu. Krok časového vektoru je pak  $1/f_{vz}$ .

Na obrázku 6.6 je znázorněn časový průběh šumu mikroplazmatu pro vzorkovací frekvenci 1 MHz. Z průběhu je zřejmé, že tento šum se projevuje jako obdélníkové pulzy, které zřetelně vystupují nad hladinu bílého šumu a lze je tedy pomocí této techniky identifikovat. Zvětšený průběh je znázorněn na obrázku 6.7.



Obrázek 6.7: Zvětšený průběh šumu mikroplazmatu,  $F_{vz} = 1 \text{ MHz}$ ,  $U_R = 14,3 \text{ V}$

LHodnoty šumu mikroplazmatu se pohybovaly okolo 0,2 mV čemu dle Ohmova zákona odpovídá při použitém odporu 5,517  $\Omega$  hodnota proudového impulsu 36  $\mu\text{A}$ .

Bistabilní chování šumu mikroplazmatu lze popsat dvou stavovým generačně rekombinačním procesem. Tento G-R proces je charakterizován generačními a rekombinačními koeficienty  $g$  a  $r$ , které jsou závislé na napětí a teplotě. Pomocí těchto koeficientů lze určit hustotu rozdělení pravděpodobnosti pro šířku pulzů  $\tau_1$  a pro mezery mezi pulzy  $\tau_0$ , případně naopak z průběhu šumu mikroplazmatu určit tyto rozdělení pravděpodobnosti a z nich pak vypočítat koeficienty  $g$  a  $r$  dle vztahů [10]:

$$f(\tau_1) = r \cdot e^{-r\tau_1} \quad (6.4)$$

$$f(\tau_0) = g \cdot e^{-r\tau_0} \quad (6.5)$$

kde  $f(\tau_1)$  je hustota rozdělení pravděpodobnosti pro šířku pulzů,  $f(\tau_0)$  je hustota rozdělení pravděpodobnosti pro mezery mezi pulzy,  $g$  je generační koeficient,  $r$  rekombinační koeficient,  $\tau_1$  je šířka pulzů a  $\tau_1$  je šířka mezery mezi pulzy.

#### 6.1.4 Spektrální analýza

Pro zpracování a analýzu změřených dat byl volen program Matlab, který umožňuje efektivní práci s velkým množstvím dat díky rychlým maticovým operacím.

Získané vzorky jsou uloženy do binárního souboru jako 32 bitové celé čísla. Při této znalosti lze jednoduše data ze souboru vyčítat a dále zpracovávat. V důsledku vysokého počtu realizací měření vzniklo na disku 100 souborů pro každou vzorkovací frekvenci. Data z těchto souborů se vyčítají ve smyčce a jsou postupně zpracovány. Při vykreslování změřených dat z binárního souboru bylo zjištěno, že při ukládání měřených vzorků na disk počítače, měřící soustava přidá v každém ukládacím cyklu dva nadbytečné vzorky. Ukládacím cyklem se rozumí doba, respektive množství vzorků, po kterém se vzorky ukládají na disk. Tento počet je dán volbou hodnoty samples to read. Například při hodnotě samples to read rovné 1000 vzorků přidá LabVIEW dva nadbytečné vzorky každých tisíc vzorků. Výskyt těchto nadbytečných vzorků se nepodařilo eliminovat a proto se musely následně softwarově odstranit.

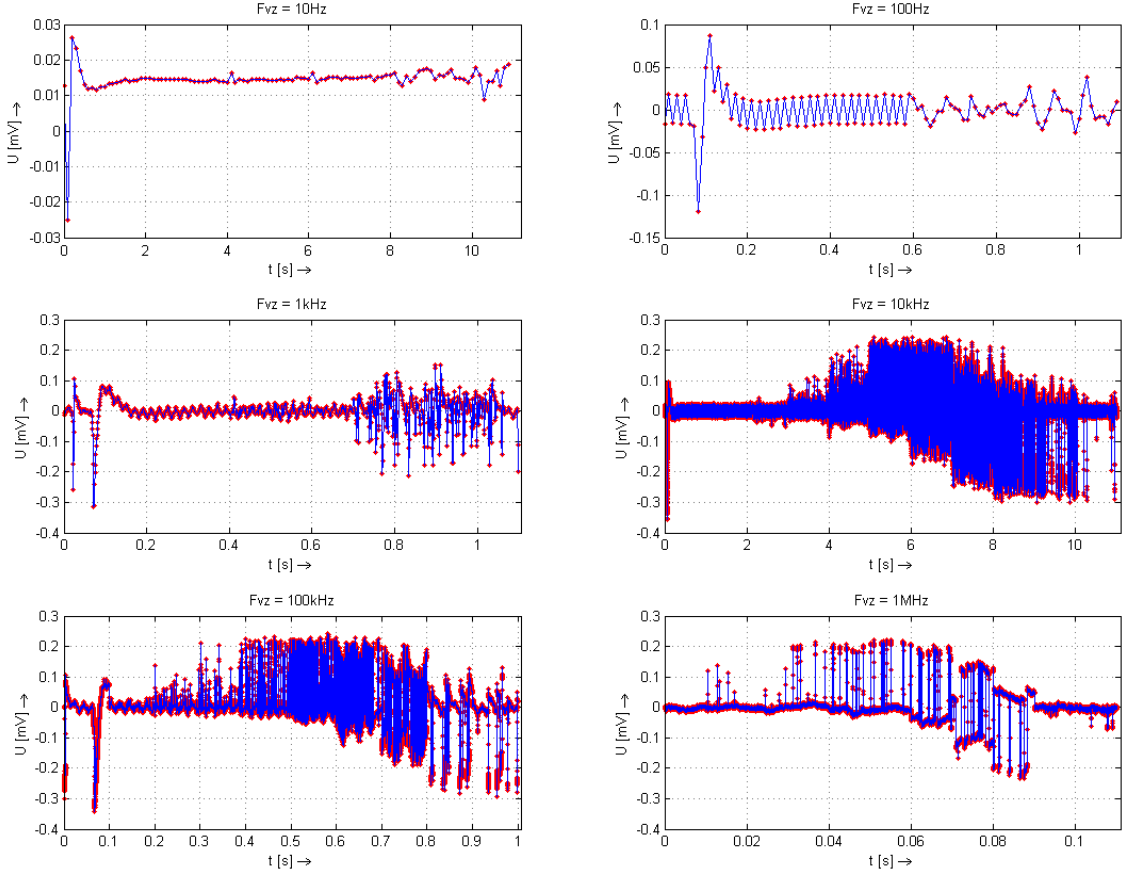
Průběh šumu mikroplazmatu na defektní oblasti vzorku solárního článku K1 je pro všechny vzorkovací frekvence znázorněn na obrázku 6.8. Z těchto průběhů jsou vypočítány jednotlivé spektrální hustoty výkonu, které jsou uvedeny na obrázku 6.9. Spektrální hustota se pro měření na daných vzorkovacích frekvencích získá ze všech sto realizací pomocí kumulace. Tím se odstraní vliv bílého šumu obsaženého v měřeném signálu.

Prímý výpočet výkonové spektrální hustoty je založen na Fourierově transformaci dat, jejíž pomocí se získá kmitočtové spektrum  $X_T(f)$ , resp. v diskretní formě  $X_k$ .

Výpočtem Fourierovy transformace pro vektor  $\vec{x}$  je vektor  $\vec{X}$ , jehož elementy se vypočítají dle vzorce [6]:

$$X_k = \sum_{n=1}^N x(n) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot (k-1) \cdot \frac{n-1}{N}} \quad (6.6)$$

kde  $X_k$  je  $k$  - tý element vektoru  $\vec{X}$  a platí  $1 \leq k \leq N$ .  $N$  je délka vstupního vektoru  $\vec{x}$ .



Obrázek 6.8: Naměřené signály pro různé vzorkovací frekvence

Hrubý odhad výkonové spektrální hustoty se pak určí jako [6]:

$$S_k = \frac{2 \cdot X_k \cdot X_k^*}{N \cdot f_s} \quad (6.7)$$

kde  $S_k$  je obousmstranná výkonová spektrální hustota,  $X_k$  je obraz vypočítaný dle 6.6,  $X_k^*$  značí komplexní konjugovanost komplexní veličiny  $X_k$ .

Jednostranná výkonová hustota se pak získá [6]:

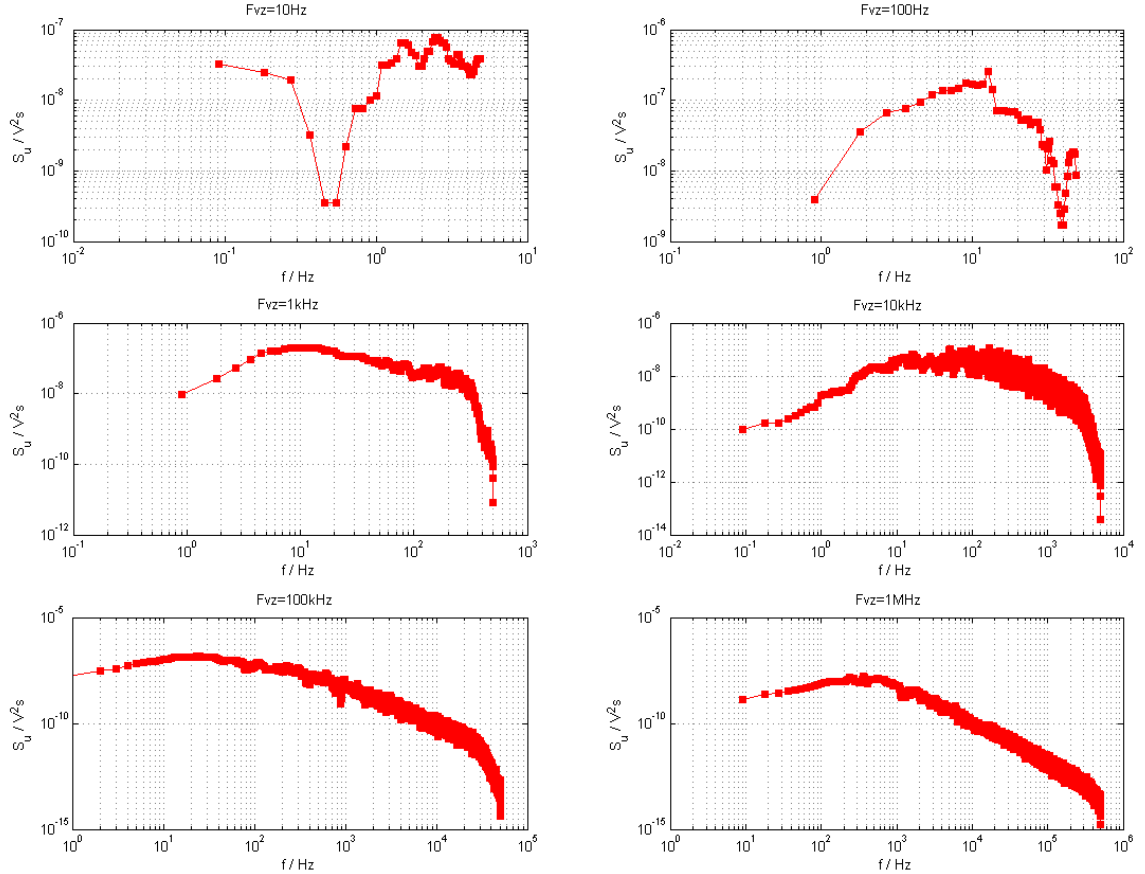
$$G_k = 2 \cdot S_k \quad (6.8)$$



kde  $G_k$  je jednostranná výkonová hustota.  
a odpovídající frekvence je [6]:

$$f_k = \frac{2 \cdot f_s}{N} \quad (6.9)$$

kde  $f_k$  je příslušná hodnota frekvence pro daný element výkonové spektrální hustoty a  $f_s$  je vzorkovací frekvence.



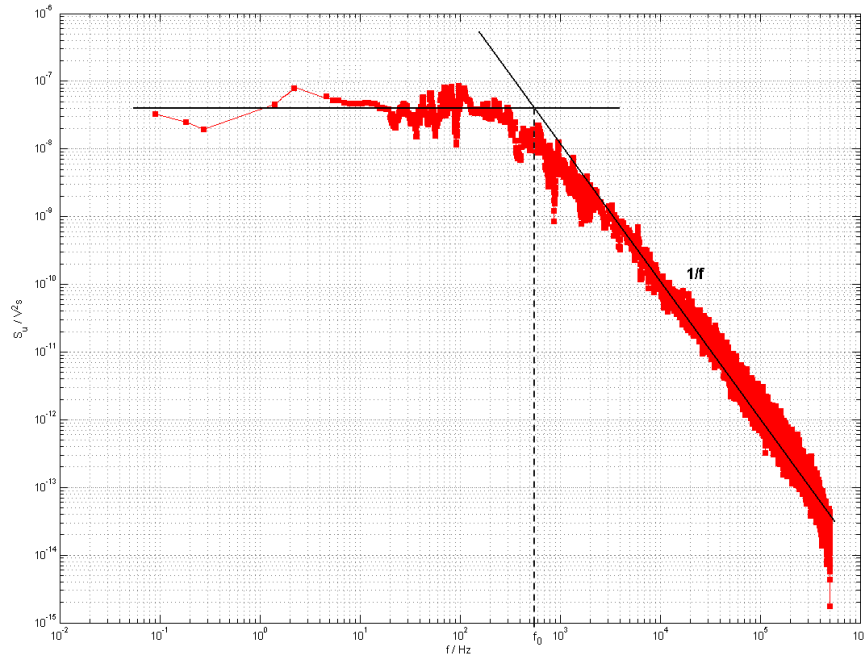
Obrázek 6.9: Spektrální hustoty výkonu šumu mikroplazmatu pro jednotlivé vzorkovací frekvence

Nyní se jednotlivé průběhy spektrálních hodnot vhodně spojí tak, aby co nej přesněji vypovídali o rozložení výkonu šumu mikroplazmatu ve frekvenčním spektru. Vychází se při tom ze znalosti vzorkovacích frekvencí a nastaveného filtru zesilovače AM22 pro jednotlivé vzorkovací frekvence. Spojením těchto průběhů vznikne spektrální analýza pro celý rozsah frekvencí. Rozložení výkonu je znázorněno na obrázku 6.10.

Spektrální výkonová hustota je závislá na závěrném napětí, teplotě a frekvenci. Lze ji popsat následujícím vzhahem [10]:

$$S_i(\omega, U_R) = \frac{4 \cdot I_M^2 \cdot g \cdot r}{(g + r)[(g + r)^2 + (2 \cdot \pi \cdot f)^2]} \quad (6.10)$$

kde  $f$  je frekvence,  $U_R$  závěrné napětí,  $I_M$  hodnota proudových impulzů,  $g$  generační koeficient,  $r$  rekombinační koeficient.



Obrázek 6.10: Spektrální hustota výkonu šumu mikroplazmatu

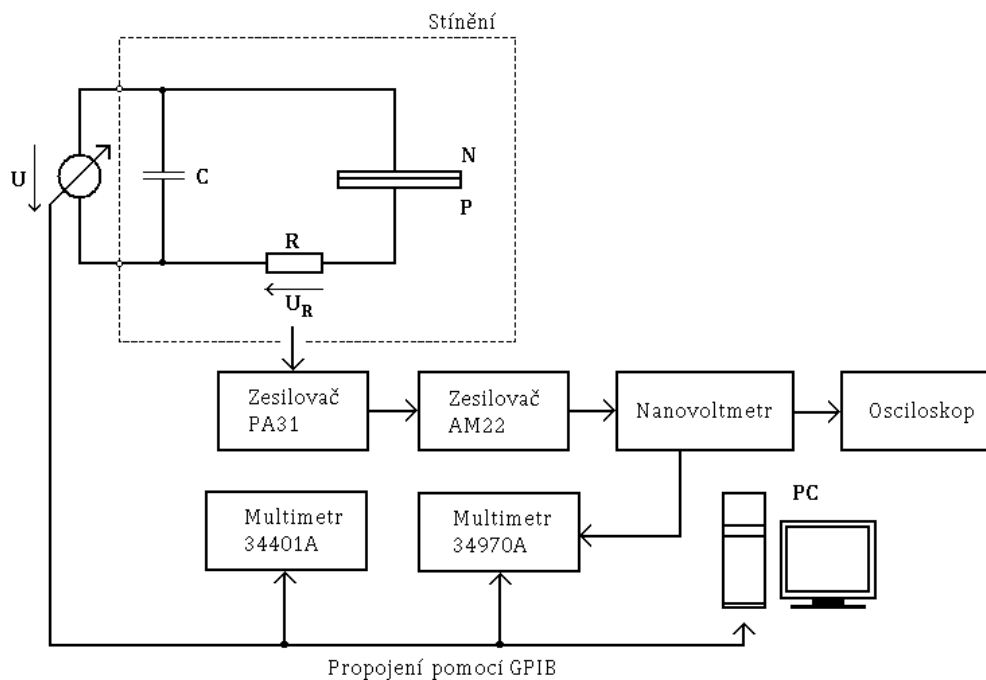
Při znalosti amplitudy proudových pulzů mikroplazmatu lze dle rovnice 6.10 určit hodnoty koeficientů  $g$  a  $r$ , které odpovídají hodnotám, které by se získaly z časového průběhu dle vztahu 6.4 a 6.5.

## 6.2 Měření transportní charakteristiky solárních článků

Další nedestruktivní metodou pro zjištění a definování defektní oblasti PN přechodu je měření pomocí tzv. transportních charakteristik. Transportními charakteristikami rozumíme C-U a V-A charakteristiky a to v propustném i závěrném směru. Pro nalezení defektní oblasti je však využíváno závěrně polarizované zapojení PN

přechodu. Z těchto měření lze získat informace o vlastnostech vzorků solárních článků.

Výskyt mikroplazmatu se nejvíce projeví na volt - ampérové charakteristice v záporném směru. Tato charakteristika se měří s využitím napěťového nebo proudového zdroje. Při použití zdroje napětí se výskyt mikroplazmatu projeví jako náhlé zvýšení proudu, zatímco s využitím proudového zdroje se ve V-A charakteristice v oblasti výskytu mikroplazmatu při skokovém navýšení proudu objeví navíc hystereze. Při měření V-A charakteristik byl využit pouze napěťový zdroj.



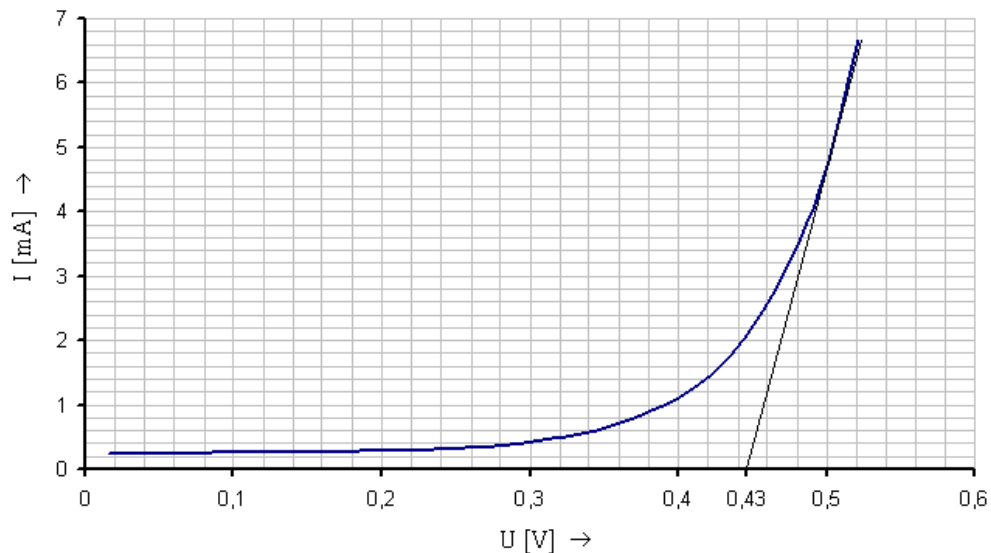
Obrázek 6.11: Zapojení pro měření VACH charakteristik

Schéma měřicího pracoviště je uvedeno na obrázku 6.11. Opět jsou použity nízkošumové zesilovače PA31 a AM22. Dále je v obvodu zapojen selektivní nanovoltmetr Unipan 237 s nastaveným středním kmitočtem 420 Hz a selektivitou 25 dB na oktávu. Šumové napětí se měří pomocí stejnosměrným voltmetrem - multimetrem Agilent 34970A.

### 6.2.1 Zapojení v přímém směru

Na obrázku 6.12 je zobrazen průběh volt - amperové charakteristiky solárního článku zapojeného v propustném směru. Se zvyšováním napětí do hodnoty 0,3 V mírně roste proud z 0,22 mA až do hodnoty 0,4 mA. Při dalším zvyšování napětí již roste proud exponenciálně a to až do hodnoty 6,6 mA, kdy bylo měření ukončeno. Této hodnotě

proudu odpovídalo napětí 0,52 V. Lze odečíst prahové napětí  $U_P = 0,43$  V. Napětí, při kterém se šum vyskytuje, to jest 14,3 V nebylo dosaženo z důvodu velkého proudu protékajícího PN přechodem a při dalším zvyšování napětí by mohlo dojít ke zničení PN přechodu. Lze tedy říct, že lokální oblasti na PN přechodu s výskytem mikroplazmatu nemají vliv na jeho funkci v propustném směru.



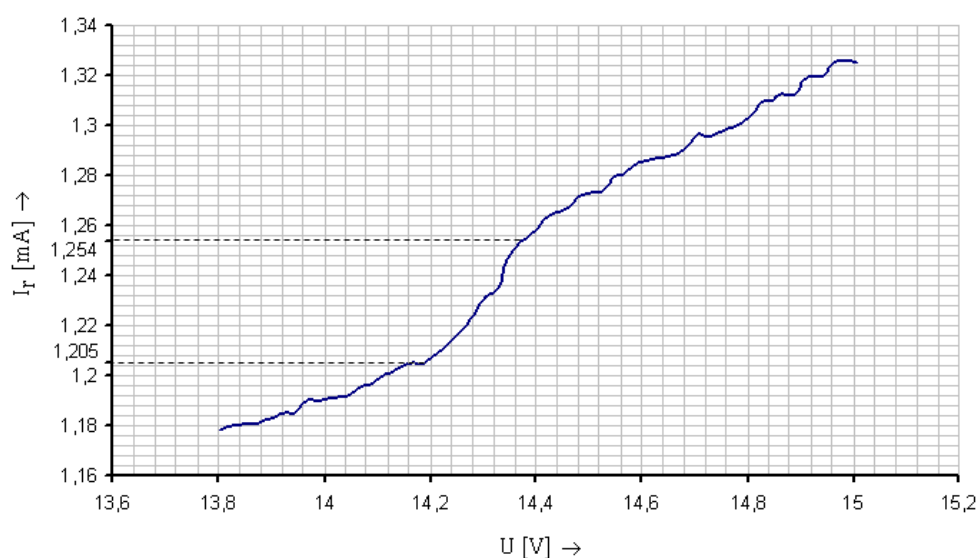
Obrázek 6.12: V-A charakteristika v propustném směru, vzorek K1

### 6.2.2 Zapojení v závěrném směru

Měřením bylo zjištěno, že při závěrném napětí odpovídajícímu napětí, při kterém se vyskytuje lokální průraz PN přechodu a to buď vlivem mikroplazmatu nebo tepelného půrazu, se na V-A charakteristice projeví jako náhlé navýšení hodnoty proudu. Bylo provedeno měření pro šum typu A (viz obrázek 6.13) i šum typu B (6.14). V obou případech lze pozorovat oblasti skokového navýšení proudu.

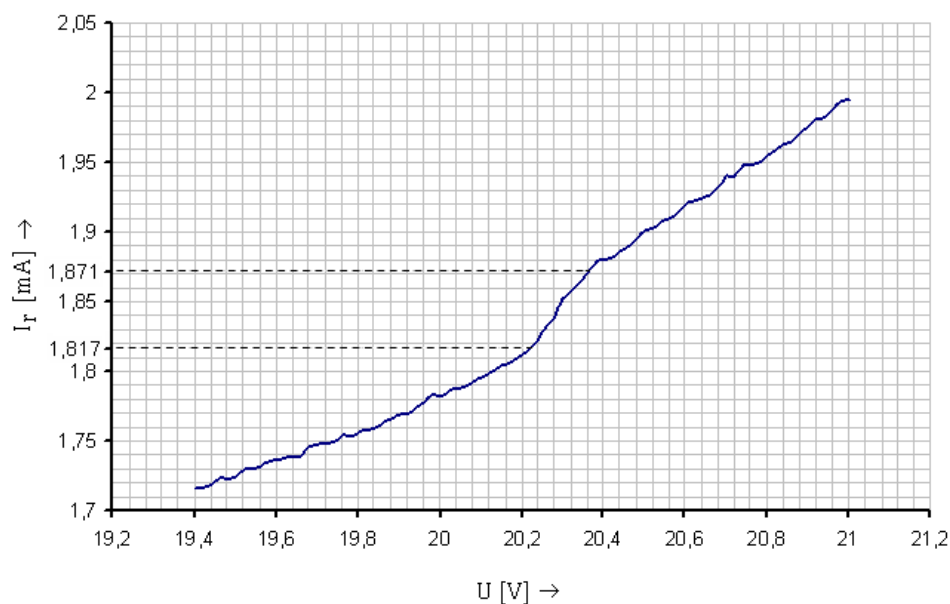
Obrázek 6.13 ukazuje závislost závěrného proudu pro výskyt šumu typu A (šum mikroplazmatu) při 14,3 V. Tento typ šumu je způsoben lokálními průrazy PN přechodu, které vznikají vlivem nedokonalosti technologie. Zde je vidět skok měřeného závěrného proudu z 1,225 mA na 1,247 mA, tedy o  $49 \mu\text{A}$ .

Na obrázku 6.14 je znázorněna závislost proudu na napětí solárního článku v závěrném směru. Na tomto fragmetu byl zjištěn šum typu B při závěrném napětí 20,3 V. Je vidět, že se zvyšujícím se závěrným napětím téměř lineárně roste i proud v závěrném směru. Je však pozorována oblast mezi 20,2 V a 20,4 V závěrného napětí, kde dochází ke skokovému nárůstu proudu solárním článkem. Hodnota proudu zde skočila z hodnoty 1,817 mA na 1,87 mA, tedy o  $54 \mu\text{A}$ . Toto navýšení proudu



Obrázek 6.13: V-A charakteristika v závěrném směru, vzorek K1,  $U_R = 14,3\text{ V}$

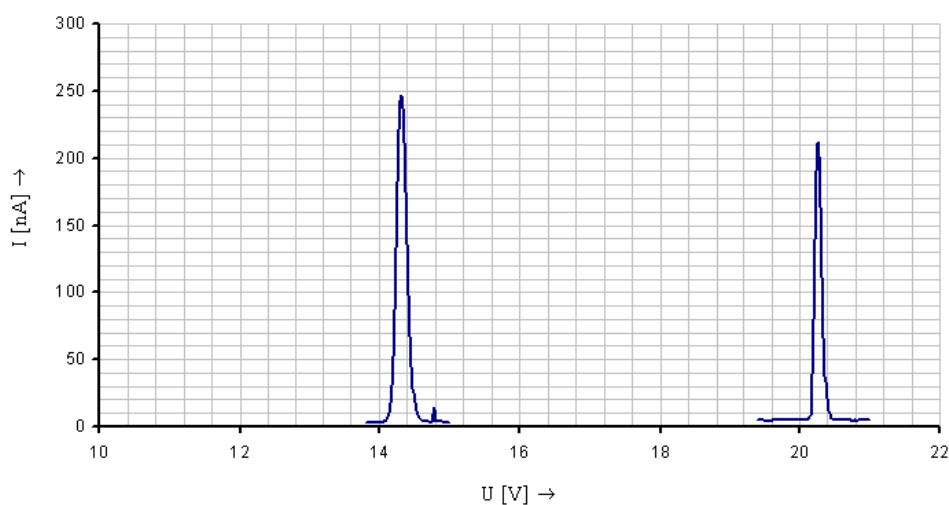
je způsobeno lokálním průrazem PN přechodu a tedy vznikem vodivého kanálu způsobeného tepelným průrazem PN přechodu. V oblasti závěrného napětí 20,3 V je tedy identifikována defektní oblast PN přechodu.



Obrázek 6.14: V-A charakteristika v závěrném směru, vzorek K1,  $U_R = 20,3\text{ V}$

### 6.2.3 Detekce efektivní hodnoty šumového proudu

Při měření V-A charakteristiky je zkoumána závislost šumového proudu na závěrném napětí. Je zjištěno, že špičková hodnota šumového proudu odpovídá oblasti lokálního průrazu PN přechodu. Jak ukazuje obrázek 6.15 závěrné napětí při kterém jsou měřeny špičkové hodnoty šumového proudu přesně odpovídá závěrnému napětí pro oba typy šumů. V průběhu tedy všechny špičky šumového proudu odpovídají defektní oblasti PN přechodu.



Obrázek 6.15: Efektivní hodnota šumového proudu

Lze rozeznat každý vznik kanálu v PN přechodu, protože efektivní hodnota šumového proudu vystupuje vysoko nad svoji normální hodnotu. Rozdíl šumového proudu je až více než znatelný a lze tvrdit, že tato metoda je ze zmíněných metod nejvhodnější pro rychlé zjišťování defektní oblasti na PN přechodu. Na základě této charakteristiky lze stanovit i počet jednotlivých lokálních defektních oblastí, který odpovídá počtu špičkových hodnot šumového proudu. Tato metoda je vhodná k realizaci a umožňuje rychlou kontrolu PN přechodu.

## 7 ZÁVĚR

Práce byla zaměřena na měření šumových a transportních charakteristik solárních článků. Zejména zkoumání defektní oblasti různými metodami měření. Byly implementovány základní metody nalezení defektní oblasti PN přechodu.

První metodou je zobrazení signálu v časové oblasti. K tomuto účelu bylo vytvořeno plně automatické pracoviště kontinuálního měření pomocí měřicí karty DAQmx od firmy National instruments spolu se softwarem LabVIEW. Tento měřicí systém umožňuje kontinuálně měřit s vzorkovací frekvencí až 1MHz a následně měřená data zobrazit a zpracovávat v PC. Pracoviště obsahuje dva měřicí programy vytvořené v prostředí LabVIEW. První vytvořený program „Find microplasma.vi“ slouží k nalezení defektních oblastí na PN přechodu, kdy se v závislosti na závěrném napětí přechodu pozoruje průběh šumového signálu. Druhý program umožňuje automatické kontinuální měření při více vzorkovacích frekvencích, které se po zadání mezních hodnot nastavují automaticky po dokončení měřicího cyklu, který může mít volitelný počet realizací. Kontinuální získávání vzorků je omezeno pouze místem na disku, kam se ukládají. Při dostatečném prostoru na disku lze měřit libovolně dlouhou dobu. Při měření na tomto pracovišti byl nalezen a prozkoumán šum mikrolazmatu viz obr. 6.7, který se projevil při závěrném napětí 14,3 V. Z jeho průběhu byla určena výkonová spektrální hustota, jejíž průběh vedl k šumu typu A (viz obr. 6.10).

Další metodou zjištění defektní oblasti je pomocí volt - ampérových charakteristik měřených v závěrném směru. Bylo zjištěno, že při zvyšování závěrného napětí dojde ke skokovému zvýšení závěrného proudu přesně v oblasti výskytu defektní oblasti a to pro šum typu A i typu B. Tato metoda z důvodu malé skokové změny viz obr. 6.13 a 6.14 závěrného proudu není vhodná pro další využívání.

Jako nejvíce využitelná metoda zjištění defektní oblasti šumu mikrolazmatu je měření efektivní hodnoty šumového proudu. Tato metoda sleduje závislost efektivní hodnoty šumového proudu na závěrném napětí. Při výskytu každé defektní oblasti dojde k prudkému navýšení šumového proudu viz obr. 6.15 a na základě této charakteristiky lze stanovit i počet jednotlivých lokálních defektních oblastí, který odpovídá počtu špičkových hodnot šumového proudu. Tato metoda je snadno realizovatelná a umožňuje rychlou a efektivní časově nenáročnou kontrolu PN přechodu vhodnou pro využití v továrním provozu.

Lze taktéž pozorovat vzájemnou souvislost mezi jednotlivými charakteristikami, kdy přesně v oblasti výskytu defektní oblasti dochází při měření V-A charakteristik v závěrném směru ke skokovému navýšení závěrného proudu, nebo objevení špičkových hodnot u měření šumového proudu. Taktéž lze pozorovat jistou souvislost mezi reprezentací šumu v časové oblasti a reprezentací pomocí spektrální výkonové

hustoty, kde je možné z obou průběhů určit koeficienty  $g$  a  $r$  šumu typu A, popsaného generačně-rekombinačním procesem.

Defektní oblast detekovaná na PN přechodu nemá vliv na jeho funkci, vypovídá však o kvalitě technologie a slouží jako zpětná vazba pro výrobce. Hlavním důvodem proč je třeba tyto defektní oblasti hledat a eliminovat je zvýšení účinnosti solárních článků. Při výskytu defektní oblasti dochází ke zvýšení difuzního napětí a tím se snižuje i účinnost solárních článků. Proto je vhodné nevyužívat články s výskytem mikroplazmatu a separovat od ostatních.



## REFERENCE

- [1] Musil, V., Boušek, J., Horák, M., Hégr, O. *Elektronické součástky*. Skripta FEKT VUT v Brně. 2007, 263 stran
- [2] Šebesta, V. *Systémy, procesy a signály 1*. Skripta FEKT VUT v Brně. 1994, 79 stran
- [3] Čtyroký, J., Hüttel, I., Schröfel, J., Šimánková, L. *Integrovaná optika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1986. s. 198. ISBN 04-541-86
- [4] Koktavý, P. *Nedestruktivní diagnostika a fyzika dielektrik*. Skripta FEKT VUT v Brně. 2006, 102 stran
- [5] Würfel, P. *Physics of Solar Cells*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2005. s. 188. ISBN 3-52740428-7
- [6] Smékal, Z. *Číslíkové zpracování signálů*. Skripta FEKT VUT v Brně. 2007, 168 stran
- [7] Ziel, A. *Noise in Solid State Devices and Circuits*. Wiley-Interscience, 1986. ISBN 0-471-83234-0
- [8] Vaseghi, S., V. *Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*. 2. vyd. John Wiley & Sons Ltd, 2000. ISBN 0-471-62692-9
- [9] Koktavý, P., Koktavý, B., Sadovský, P., Macků, R. *Noise Diagnostic of Local Defects in Solar Cells*. Brno, 2007. 5 s.
- [10] Koktavý, P., Sadovský, P., Krčál, O. *Noise Diagnostic of Solar Cells*. Brno, 2007. 4 s.
- [11] *National Instruments* [online]. c. 2008, Dostupné z URL: <<http://www.ni.com>>.
- [12] Farkašová, B., Krčál, M. *Projekt bibliografické citace dle normy ČSN ISO 690 a ČSN ISO 690-2* [online]. 2004-2008, [cit. 15. 5. 2008]. Dostupné z URL: <<http://www.citace.com/clanky.php>>.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$A$      Konstanta

CPU    centrální procesorová jednotka (Central Processor Unit)

$e$      elementární náboj elektronu ( $e = 1,602e^{-19}$ )

DMA    Direct Memory Access - způsob, kterým počítače umožňují hardwarovému subsystému přímý přístup do operační paměti tzn. bez účasti procesoru

$E_F$     Fermiho energie

$E_{FC}$     Fermiho energetická hladina pro elektrony distribuované ve vodivostním pásu

$E_{FV}$     Fermiho energetická hladina pro elektrony distribuované ve valenčním pásu

$E_g$     energie zakázaného pásu

FIFO    typ ukládání do paměti, data která jsou do ní uložena jako první, také jako první z paměti vyčítáme - First In First Out

$f_{vz}$     vzorkovací frekvence měřící karty

G     programovací jazyk programu LabVIEW

GPIO    General Purpose Interface Bus - univerzální měřicí systém, navrženo pro propojení měřících přístrojů

$I$      Střední hodnota proudu procházející PN přechodem

$I_1, I_2$     proudy tekoucí anodami

$I_R$     střední hodnota proudu přechodem v závěrném směru

$k$      Boltzmannova konstanta ( $k = 1,380658e^{-23} JK^{-1}$ )

$M$     součinitel násobení

PC    osobní počítač - Personal Computer

PCI    zkratka pro počítačovou sběrnici sloužící k připojení periférií k základní desce - Peripheral Component Interconnect

$R$     odpor vodiče, ve kterém se generuje tepelný šum

$S$     krok, po kterém se navyšuje napětí zdroje (Step Value)

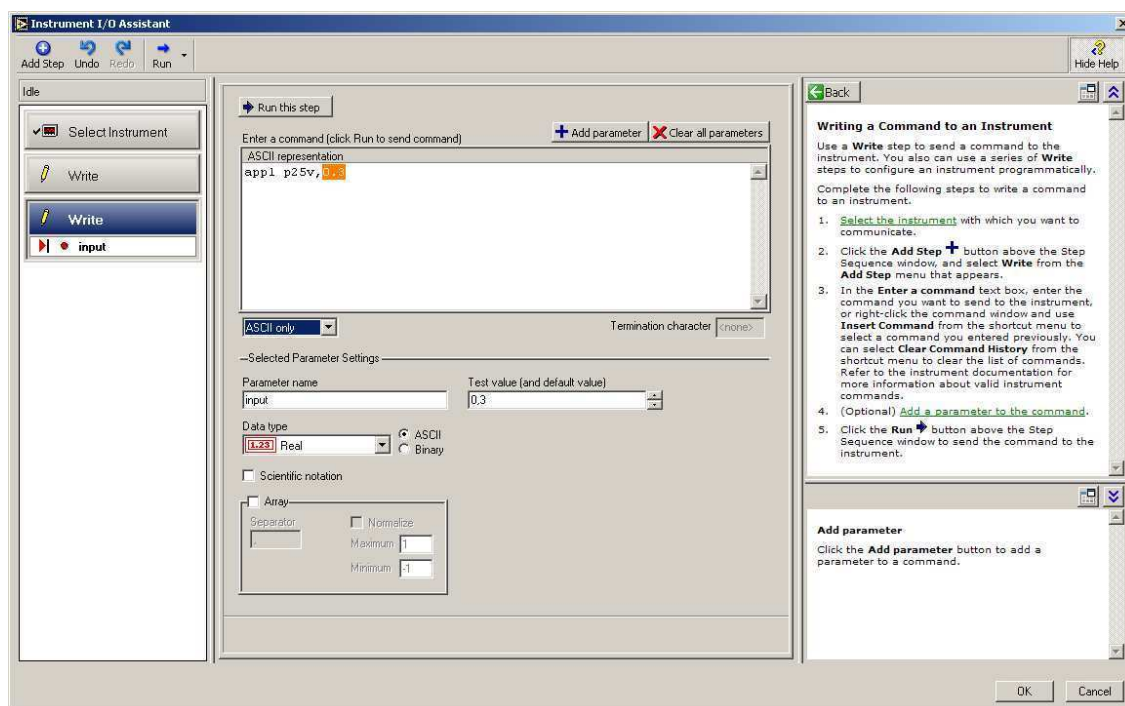
$S_i(f)$	spektrální výkonová hustota proudu
$S_i(f, I)$	spektrální výkonová hustota proudu výstřelového šumu
$S_u(f)$	spektrální výkonová hustota šumového napětí
$S_i(\omega)$	spektrální výkonová hustota proudu pro lavinový šum
$T$	termodynamická teplota (1), Doba průchodu nosiče přechodem (6)
$U_d$	difuzní napětí
$U_{p-p}$	napětí špička - špička měřeného signálu
$v$	rychlost nosiče náboje
$V_E$	koncová hodnota napětí zdroje (End Value)
VI	okno programu LabVIEW převzato z virtuálního nástroje - Visual Instruments
$V_S$	počáteční hodnota napětí zdroje (Start Value)
$W$	šířka báze PN přechodu
$\tau_k$	šumová časová konstanta
$\omega$	driftová rychlost
$\chi$	elektronová afinita

# SEZNAM PŘÍLOH

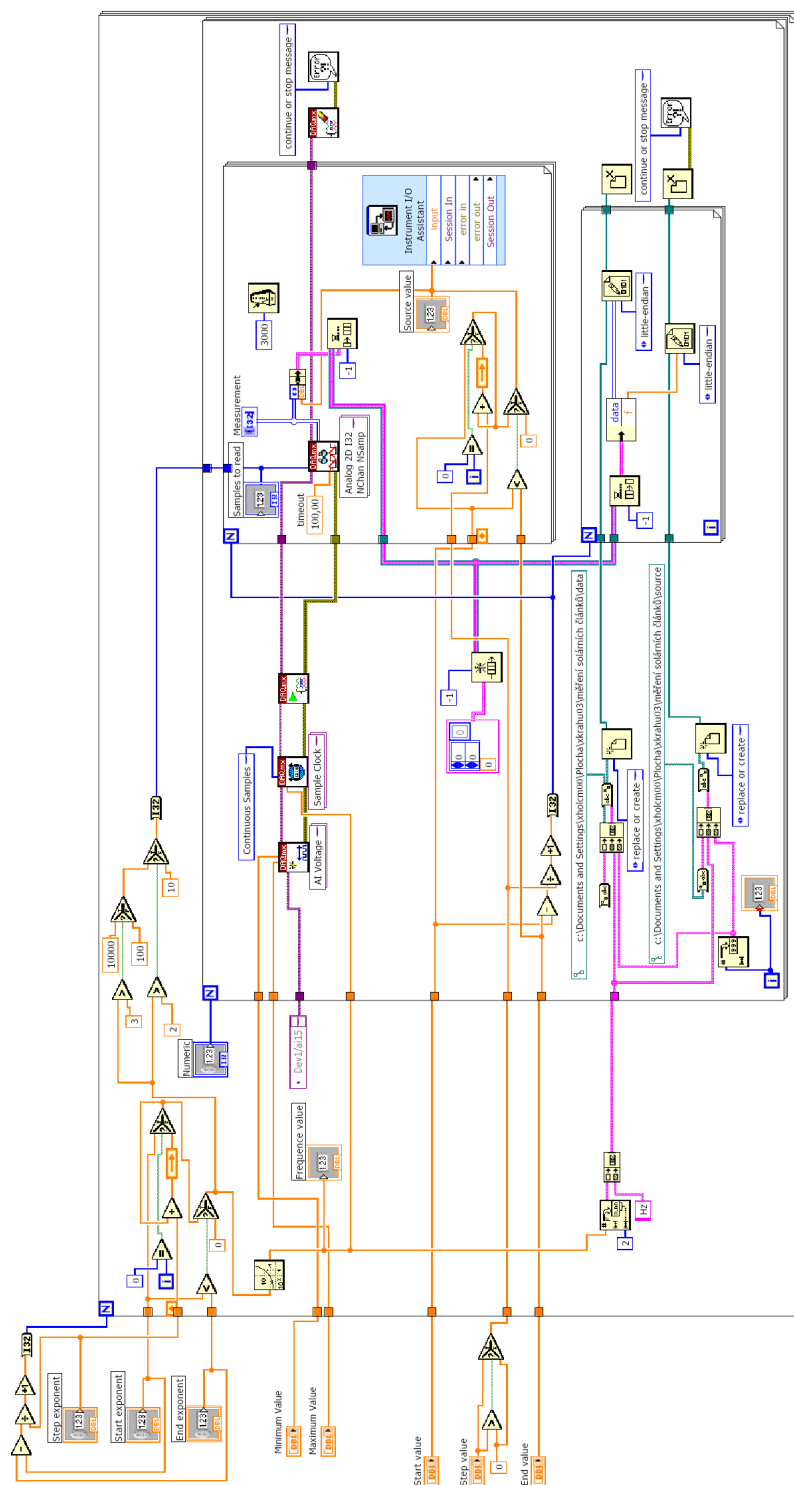
<b>A</b>	<b>Ovládací prvky a bloková schémata programu LabVIEW</b>	<b>61</b>
A.1	Nastavení Instruments I/OAssistant . . . . .	61
A.2	Zdrojový kód programu podrobného měření na daném rozsahu . . . .	62
<b>B</b>	<b>Prezentování vzdáleného měření na webu</b>	<b>63</b>
B.1	Úvodní stránka . . . . .	63
B.2	Stránka měření . . . . .	64
B.3	Výsledky měření . . . . .	65

# A OVLÁDACÍ PRVKY A BLOKOVÁ SCHÉMATA PROGRAMU LABVIEW

## A.1 Nastavení Instruments I/OAssistant



## A.2 Zdrojový kód programu podrobného měření na daném rozsahu



# B PREZENTOVÁNÍ VZDÁLENÉHO MĚŘENÍ NA WEBU

## B.1 Úvodní stránka

Vzdálená laboratoř

Menu:  
[Home](#)  
[Měření](#)  
[Výsledky měření](#)

**Vzdálená laboratoř**

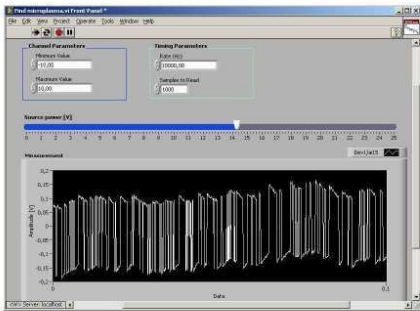
Jednou ze základních metod používaných pro šumovou diagnostiku solárních článků je dlouhodobá spektrální analýza, ke které je zapotřebí dlouhých úseků signálu. K získání těchto úseků je určeno pracoviště kontinuálního měření, které je schopno měřit vzorkovací frekvenci až do 1 MHz. Jádrem pracoviště je měřicí karta DAQuix 6251 od firmy National instruments, která je ovládána programem LabVIEW. Získané vzorky měřeného signálu jsou ukládány na pevný disk počítače a připraveny k dalšímu zpracování.

Na těchto stránkách lze uskutečnit takovéto měření z kteréhokoli místa přímo přes webový prohlížeč a získané data zapsat do binárního souboru pak stáhnout. V laboratoři je zapojený obvod se solárním článkem, na kterém již byla naměřen šum mikroplazmatu. Aby se při hledání mikroplazmatu nemusel podrobně zkoumat celý rozsah napětí, lze nejdříve nalézt ručním nastavením zdroje oblast, kde se šum vyskytuje. Ve chvíli kdy je známo v které oblasti napětí mikroplazmu očekávat, lze přejít k podrobnému měření, kdy se budou data ukládat na disk. Změněná data lze dále zpracovávat a získat tak širokopásmové spektrum. Pro správné zobrazení ovládacích panelů měření je třeba nainstalovat tento zásuvný [modul](#).

- návod na obsluhu

**1. Nalezení mikroplazmatu**

Na obrázku č.1 je ovládací panel aplikace měření s ručním ovládním zdroje napětí. Před spuštěním měření je nutné nejprve nastavit vstupní parametry s kterými je požadováno měření. V oblasti "Timing Parameters" nastavujeme vzorkovací frekvenci a počet vzorků po kterém se budou data vykresovat v oblasti grafu.

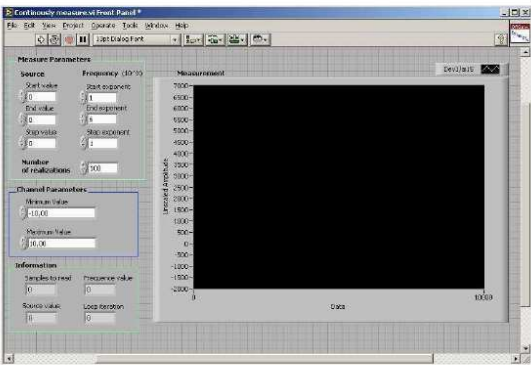


Obr.1 - Nalezení mikroplazmatu

V oblasti "Channel Parameters" nastavíme očekávanou velikost měřeného napětí, které je přivedeno na vstupní analogový kanál měřicí karty. Po nastavení měřicích parametrů lze spustit měření stisknutím tlačítka "Run continuously" a nastavovat ježděm hodnotu napětí zdroje. Při stisknutí tlačítka "Run" nebudeme moznost kontinuálního ovládní zdroje napětí. Při nalezem mikroplazmatu pak zjistit v jakém rozsahu se šum nachází a tyto hodnoty zadat jako vstupní parametry při podrobném měření na daném úseku. Měření ukončíme stiskem červeného tlačítka "stop".

**2. Podrobné měření úseku s šumem mikroplazmatu**

Ve chvíli, kdy je známo v jaké oblasti se šum mikroplazmatu nachází, je možné tuto oblast podrobněji prozkoumat a změněná data uložit na disk. Na obrázku č.2 je zhmotněn ovládací panel kontinuálního měření. V oblasti "Measure Parameters" se nastaví v poli "Start value [V]" počáteční napětí na zdroji. Od této hodnoty bude narůstat napětí v obvodu v závislosti na zadaném inkrementu, který se zadá v poli "Step value [V]", až do konečné hodnoty "End value [V]". Během tohoto krokovaní napětí budou měřeny data na vstupu měřicí karty a ukládány na disk. Program umožňuje automatické měření pro různé vzorkovací frekvence. Zadaním parametrů v oblasti Frequency se nastaví rozsah vzorkovacích frekvencí, přičemž při každé z nich proběhne počet realizací měření dle vyplnění pole Number of realizations. Tím se získá opakované měření pro zlepšení přesnosti. Ostatní parametry se vyplní stejně jako v předchozím případě. Měření se opět spustí stisknutím tlačítka "Run continuously" a ukončí tlačítkem stop.



Obr.2 - Podrobné kontinuální měření na daném úseku

Měřená data jsou uložena v souborech pojmenovaných dle vzorkovací frekvence a číslem měření a lze je stáhnout z řip, na které se lze dostat pomocí odkazu ve výsledcích měření.

## B.2 Stránka měření

VZDÁLENÁ LABORATOŘ	
<b>Menu:</b> <a href="#">Home</a> <a href="#">Měření</a> <a href="#">Výsledky měření</a>	<p><u>Nalezení šumu mikroplazmatu:</u> Nalezení úseku s šumem mikroplazmatu ručním nastavováním napětí na solárním článku. Data se neukládají na disk.</p> <p><u>Podrobné měření úseku s šumem mikroplazmatu:</u> Kontinuální měření úseku, kde je očekávaný šum mikroplazmatu. Dochází k ukládání dat.</p>



## B.3 Výsledky měření

VZDÁLENÁ LABORATOŘ	
<b>Menu:</b> <a href="#">Home</a> <a href="#">Měření</a> <a href="#">Výsledky měření</a>	<b>Stáhnutí výsledků měření</b>  <a href="#">Zde</a> lze procházet ftp, nebo se přihlásit pomocí svého ftp klienta na adresu 147.229.152.71 pod jménem anonymous bez hesla. Na uvedené adrese je možné stáhnout také soubor pro zpracování a zobrazení měřených dat v programu matlab.